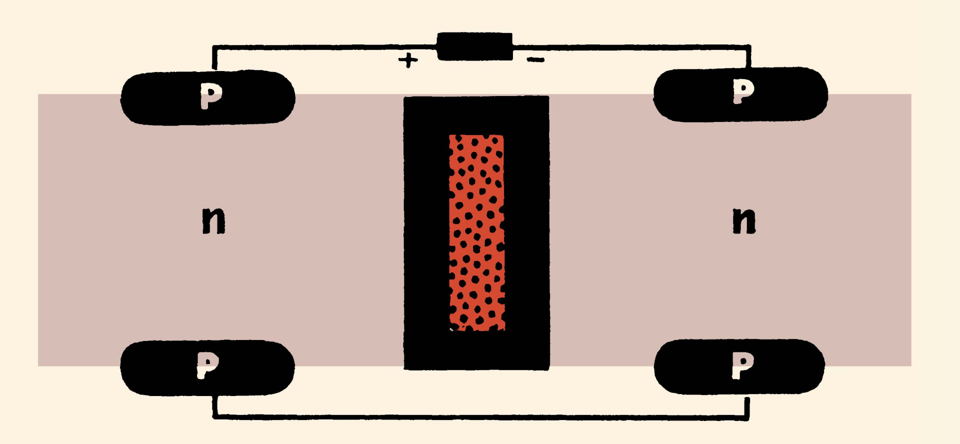


В. Ю. РОГИНСКИЙ



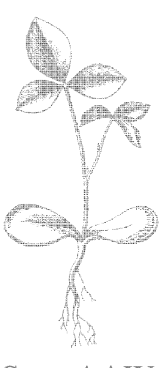
СОВРЕМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 693

В. Ю. РОГИНСКИЙ

СОВРЕМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ





„ЭНЕРГИЯ"
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1969

УДК 621.311.6
6 Ф 2.14
Р 59

Рогинский В. Ю.

Р59 Современные источники электропитания. «Энергия» Л., 1969.

104 с. с рис. 30 000 экз.

В брошюре кратко описаны источники тока, нашедшие за последние годы применение для электропитания радиоустройств различного назначения, в том числе новые гальванические элементы и батареи, аккумуляторы, термоэлектрогенераторы на обычном топливе, в сочетании с радиоактивными источниками тепла и конденсаторами энергии солнечной радиации, а также вторичные источники тока с управляемыми полупроводниковыми вентилями.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

3-4-5

385-68

Рогинский Владимир Юрьевич

СОВРЕМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Редактор *Ю. Л. Тимаев*
Художественный редактор *Г. А. Гудков*
Технический редактор *Е. М. Соболева*
Корректор *М. Э. Орешенкова*
Сдано в производство 11/XI 1968 г. Подписано к печати 6/II 1969 г. М-10297. Печ. л. прив. 5,46. Уч.-изд. л. 6,6. Бум. л. 1,63. Бумага типографская № 1. Формат 84×108$^{1}/_{32}$. Тираж 30 000. Заказ 198. Цена 28 коп.

Ленинградское отделение издательства «Энергия».
Марсово поле, 1.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, Ленинград, Гатчинская ул., 26.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, источники электрического питания являются неотъемлемой частью всякого радиоэлектронного устройства. Это наглядно видно на примере вторичных источников тока, например таких, как выпрямители, стабилизаторы, преобразователи напряжения постоянного тока. Их надежность и экономичность работы, эксплуатационные свойства, стоимость и габариты предопределяют соответствующие показатели всего устройства. В известной мере это касается также и устройств с автономными (первичными) источниками тока, к которым относятся гальванические элементы, различные типы генераторов тока и непосредственные преобразователи энергии. От этих источников тока зависит нормальный режим работы всего устройства, срок службы, вес и габариты, стоимость и надежность их действия. В подтверждение сказанного можно напомнить сообщения мировой печати, в которых объясняется прекращение действия искусственных спутников Земли и космических кораблей из-за отказа в работе источников питания. Можно привести множество других подобных примеров.

Проблема создания экономичных, надежных малогабаритных источников электрической энергии для питания современных радиоэлектронных устройств промышленной и радиолюбительской конструкций становится все более актуальной, и этому делу уделено значительное внимание во всех странах мира за последние десять лет.

В настоящее время четко определились тенденции развития и совершенствования источников электропитания на основе общего прогресса технологии производства аппаратуры, деталей и материалов с применением полупроводниковых приборов, улучшения и разработки новых электрохимических источников тока, введения в схемы преобразования тока элементов автоматики с целью повышения надежности действия, расширения диапазона рабочих температур, уменьшения веса и габаритов, использования более точных методов расчета и использования рациональных электрических схем. При этом исходят из необходимости решения ряда задач, коротко описанных ниже.

Повышение к. п. д. вторичных источников тока (выпрямителей, сглаживающих фильтров и стабилизаторов напряжения) — весьма актуальная задача, поскольку количество этих источников велико и непрерывно растет вместе с теми устройствами, где они используются. К таким устройствам в СССР можно отнести 24 млн. телевизоров, около 70 млн. радиоприемников, радиол и магнитофонов, более

30 млн. измерительных приборов широкого применения (осциллографы, вольтметры, генераторы и др.), десятки миллионов усилителей в кинотеатрах и промышленных предприятиях, в установках автоматизации и контроля производственных процессов.

Мощность указанных вторичных источников тока оценивается от единиц ватта до 150—200 *вт,* а их к. п. д приблизительно равен 15—30%. Суммарная мощность этих источников тока велика, она непрерывно растет и существенно отражается на всем энергетическом балансе страны.

Легко понять, что к. п. д. вторичных источников тока зависит от многих условий их эксплуатации. Определяющими факторами решения задачи повышения к. п. д. являются экономичные вентили, точные расчеты всех элементов схемы с целью уменьшения потерь в них, уменьшение веса и габаритов, а также обеспечение надежности действия.

Известно, что кенотроны не могут обеспечивать высокие значения к. п. д. выпрямителей, поскольку в них велики потери на накал и рассеяния мощности на анодах. Повышение к. п. д. трансформаторов связано с правильным выбором магнитопровода и обмоток с точки зрения уменьшения потерь в них. Большое влияние на к. п. д. источников оказывает правильный выбор схемы питания. Например, для получения постоянного тока высокого напряжения малой мощности нерационально применение схем непосредственного выпрямления тока промышленной частоты, поскольку требуются громоздкие и дорогостоящие повышающие трансформаторы и сглаживающие фильтры. Во многих случаях более рациональным может оказаться выпрямление с промежуточным преобразованием тока по частоте с использованием полупроводниковых приборов.

Широко развивающаяся миниатюризация радиоэлектронных устройств на основе использования современных методов дает удивительные результаты и явно тормозится источниками питания, которые до сих пор мало подвержены методам миниатюризации. Очевидно, источники питания непросто миниатюризовать из-за энергетических и технологических ограничений. Тем не менее можно утверждать, что многие возможности миниатюризации источников питания еще не реализованы. До сих пор в технике электропитания имеется неоправданное применение элементов схем с большим весом и габаритами, а также с электрическими параметрами, превышающими требуемые, т. е. с большим запасом. Замена вентилей, например кенотронов, на полупроводниковые, приводит к большой экономии материалов силового трансформатора и дросселя сглаживающего фильтра. Можно привести ряд других примеров возможностей миниатюризации источников питания. При этом решение задачи миниатюризации окажется полезным в решении других смежных задач, в частности по повышению к. п. д.

Задача миниатюризации коснулась гальванических элементов и аккумуляторов. Она решается путем применения новых гальванических пар, рациональной конструкции и более активных материалов. Одновременно с миниатюризацией ча-

стично решены задачи повышения надежности действия, увеличения срока службы и эксплуатационных свойств источников тока. Тем не менее достигнутые результаты еще не настолько внедрены и не стали общедоступными в том числе и для радиолюбителей.

В связи с прогрессивным распространением полупроводниковых приборов к источникам электропитания предъявляются требования совместимости с транзисторными схемами. Эти требования многими источниками тока не удовлетворяются. Требования различны, и они конкретно зависят от особенностей работы транзисторных схем. С некоторым приближением можно считать, что эти требования такие же, как и предъявляемые к источникам питания транзисторных усилителей низкой частоты относительно малой мощности. Более строгие требования предъявляются к источникам питания транзисторных устройств с большими коэффициентами усиления, с пониженным уровнем шума и т. п.

Как правило, все каскады транзисторных многокаскадных устройств питаются от одного общего источника постоянного тока с напряжением $E_к$, необходимым для нормальной работы оконечного каскада. Все остальные каскады устройства питаются через соответствующие фильтрующе-развязывающие цепи и делители напряжения. При этом значение $E_к$ выбирается в зависимости от выходной мощности устройства примерно в следующих пределах:

$E_к = 3 \div 6$ *в* при $P_{вых} = 0,1 \div 0,5$ *вт*;
$E_к = 4 \div 9$ *в* при $P_{вых} = 0,5 \div 2,0$ *вт*;
$E_к = 9 \div 15$ *в* при $P_{вых} = 2 \div 3$ *вт*.

При выборе источника питания транзисторных схем надо считаться с сопротивлением источника тока для постоянных и переменных составляющих тока нагрузки. Допустимые пределы величин сопротивлений источника тока зависят от режима работы транзисторного устройства и ряда других эксплуатационных особенностей.

При питании транзисторного усилителя мощности в режиме класса А по однотактной схеме сопротивление источника тока для самой низкой частоты усиливаемых сигналов не должно превышать 0,25 $R_{к.\,пер}$, где $R_{к\ пер}$ — сопротивление нагрузки транзистора по переменному току. Сопротивление источника постоянному току не имеет существенного значения, поскольку в процессе усиления величина тока $I_{ко}$ не меняется и не влияет на напряжение $E_к$.

При питании транзисторного усилителя в режиме класса В сопротивление источника постоянному току должно быть настолько малым, чтобы при запертых транзисторах выходного каскада напряжение $E_{к\ х.\,х}$ не превышало рабочее напряжение $E_к$ больше чем на 10—15%. В противном случае окажутся заметно большими нелинейные искажения. Чтобы частотные искажения были невелики, сопротивление источника переменному току не должно превышать 0,2 $R_{к\ пер}$.

Значительно меньше требования к источнику питания при работе двухтактного транзисторного усилителя в режиме класса А, поскольку такие схемы малочувствительны к изменениям питающего напряжения.

Приведенным требованиям могут удовлетворить не только электрохимические источники тока, но и некоторые маломощные выпрямители. Две простейшие схемы выпрямителей, используемых для питания транзисторных схем или для зарядки аккумуляторов емкостью до 0,2 ÷ 0,5 *а · ч,* приведены на рис. 1.

Схема рис. 1, *а* представляет собой однофазную мостовую схему выпрямления с простейшим регулируемым стабилизатором выходного напряжения, в качестве которого включен

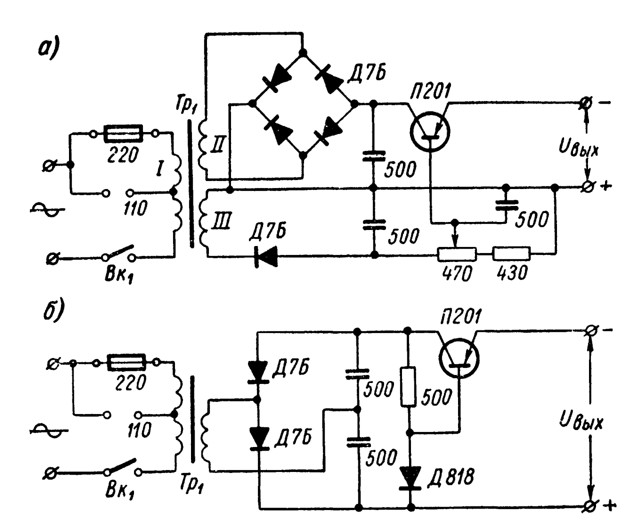


Рис. 1. Схемы выпрямителей для питания транзисторных приемников от сети: *а* — мостовая; *б* — с удвоением напряжения.

транзистор, а для создания опорного напряжения использован вспомогательный однотактный выпрямитель, питаемый от отдельной обмотки трансформатора. Изменением местоположения движка переменного сопротивления можно регулировать выходное напряжение. Указанные на схеме данные позволяют включать выпрямитель в сеть переменного тока частотой 50 *гц* при напряжениях 110/220 *в*; выходное напряжение регулируется от 4,5 до 10,0 *в* при токе нагрузки до 100 *ма.* Трансформатор с магнитопроводом Ш-25 при толщине набора 32 *мм* имеет обмотку *1* из 453 ÷ 621 витков из провода ПЭЛ-0,35, а обмотки *II* и *III* содержат по 66 витков провода ПЭЛ-1 диаметром 0,44 *мм.*

На рис. 1, *б* приведена схема однофазного выпрямителя с удвоением напряжения с простейшей схемой стабилизатора напряжения с транзистором, причем в качестве источника опорного напряжения стабилизатора использован стабилитрон

Д818. Выходное напряжение равно 9,0 *в* при токе нагрузки около 100 *ма*

При питании транзисторного усилителя низкой частоты от выпрямителя должно быть обращено особое внимание на сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения. При этом сглаживающий фильтр рассчитывается на допустимую величину пульсации напряжения, которым питается выходная цепь усилителя, а дополнительное сглаживание пульсации осуществляется при помощи развязывающих цепей.

Для трансформаторных однотактных и бестрансформаторных двухтактных усилителей в режиме класса А допустимая амплитуда напряжения пульсации

$$U_{\text{пм}} = \frac{(0,3 \div 1,0)\,(R_{\text{вых. тр}} + R_{\text{к пер}})}{Д_{\text{с}}\,R_{\text{к. пер}}}\,U_{\text{вых. п}},$$

где $R_{\text{вых тр}}$ — выходное сопротивление транзистора в режиме покоя; $R_{\text{к пер}}$ — сопротивление нагрузки транзистора переменному току; $U_{\text{вых п}}$ — амплитуда усиленного сигнала на выходе усилителя; $Д_{\text{с}} = 100$ — динамический диапазон сигнала, т. е. отношение максимального и минимального сигналов в усилителе.

Для трансформаторного двухтактного и бестрансформаторного однотактного усилителей в режиме класса В допустимая амплитуда напряжения пульсации примерно в два раза меньше определенной выше.

Для однотактного бестрансформаторного усилителя с активной нагрузкой в режиме класса А допустимое напряжение пульсации может быть

$$U_{\text{пм}} = \frac{(0,3 \div 1,0)\,(R + R_{\text{к}})}{Д_{\text{с}}R}\,U_{\text{вых. п}},$$

где $R = \frac{R_{\text{вых. тр}}\,R_{\text{к}}}{R_{\text{вых. тр}} + R_{\text{к}}}$; $R_{\text{к}}$ — сопротивление нагрузки.

Независимо от полученного результата при вычислении следует ограничиться коэффициентом пульсации $K_{\text{п}} \leqslant 5\%$. При больших коэффициентах пульсации возникают нелинейные искажения больше допустимых и снижается выходная мощность усилителя.

Создание принципиально новых источников тока является задачей, которая ставится перед учеными и инженерами по мере возникновения новых возможностей и разрешения физических проблем, смежных с вопросами преобразования энергии любого вида в электрическую энергию. В результате наряду с усовершенствованием известных методов электропитания возникают новые. К принципиально новым источникам тока за последние 10 лет поисков относятся термоэлектронные генераторы, биологические элементы, магнитогидродинамические (МГД-генераторы) и другие. Значимость этих источников тока для электропитания радиоустройств разная. Описание некоторых из этих источников тока имеет для радиолюбителей скорее познавательную, чем практическую ценность.

Вместе с новыми разработками источников тока значительного усовершенствования достигли и такие источники тока,

как термоэлектрические, солнечные, атомные и их комбинации. В известной мере заброшены дальнейшие разработки методов электропитания радиоустройств за счет использования электронных генераторов, схем для «улавливания» энергии токов высокой частоты и преобразования этой энергии для питания маломощных радиоустройств. По-прежнему доминирующее значение имеют электромашинные генераторы, значительно усовершенствованные за последние годы, а также различные типы выпрямителей и преобразователей напряжения постоянного тока.

Требование повышения надежности, в особенности транзисторных радиоустройств, особо остро поставило вопрос о защите источников тока от повреждения за счет перегрузки по току и электрическому пробою повышенным напряжением, создаваемым в схемах при изменении режима работы. До сих пор эта задача не разрешена, хотя многое в этом направлении сделано.

Помимо перечисленных задач, необходимо отметить то новое, что создается сейчас в промышленности в области источников электропитания. Это заметно выраженная тенденция унификации источников, их миниатюризация и разработка новых схем стабилизации с повышенной надежностью. К сожалению, эти вопросы в данной брошюре не рассмотрены и являются содержанием отдельных книг массовой радиобиблиотеки.

1. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И БАТАРЕИ

Общие сведения

Гальванические элементы — первичные электрохимические источники тока — известны давно. Сейчас они получили широкое распространение благодаря применению полупроводниковых приборов в переносных радиоустройствах, для питания которых требуется низкое напряжение, легко получаемое от элементов и батарей. Совершенствование гальванических источников тока на основе общего прогресса техники привело к тому, что они стали почти незаменимыми источниками электропитания маломощных переносных радиоустройств.

Элементы существенно отличаются от таких источников тока, как аккумуляторы, тем, что они отдают электрическую энергию в нагрузку без предварительного сообщения им энергии от другого источника тока. Возникновение тока в замкнутой цепи элемента есть необратимый электрохимический процесс, обусловленный переходом валентных электронов от одного вещества (электрода) к другому вследствие различия концентрации валентных электронов в веществах электродов. Чем значительнее разница концентраций валентных электронов, тем интенсивнее происходит передача их от одного вещества к другому и тем большая разность потенциалов может быть создана такой парой электродов

Активность веществ в процессе передачи валентных электронов позволяет расположить их в ряд напряжений: калий, кальций, магний, цинк, железо, олово, водород, медь, серебро, золото. Сам по себе процесс перехода валентных электронов сводится к вытеснению одного металла другим. В ряду металлов (цинк, железо, медь, серебро) каждый предыдущий вытесняет последующий из его солей, тогда как обратное вытеснение металлов не наблюдается, т. е. происходит необратимый электрохимический процесс, связанный с расходованием одного из электродов. Например, в элементах с цинковым электродом происходит постепенное расходование цинка и элемент перестает действовать, как только весь цинк израсходуется.

Для выравнивания концентраций валентных электронов вещества электродов необходим электролит, в котором осуществляется растворение электродов. Поскольку разные металлы растворяются в электролитах по-разному, то каждый металл, погруженный в электролит, создает строго определенный потенциал в гальванической паре металл — электролит.

Если в электролит погрузить два разных металла, то между этими электродами окажется разность потенциалов, не зависящая от формы и размеров электродов.

Электрохимические процессы в элементах являются окислительно-восстановительными. Окислительный процесс сопровождается отдачей валентных электронов атомами и молекулами, а восстановительный процесс сводится к присоединению электронов атомами и молекулами. Оба процесса протекают одновременно: на одном электроде происходит окислительный процесс, а на втором — восстановительный. Как отмечалось выше, в гальванических элементах окислительно-восстановительные процессы необратимые.

В окислительно-восстановительных процессах, связанных с растворением металлов, в электролите появляются побочные химические продукты, чаще всего водород. Его выделение будет тем большим, чем интенсивнее протекают окислительно-восстановительные процессы. В результате, кроме основных гальванических пар электродов с электролитом, создается промежуточная пара металл — водород. Этот процесс называют поляризацией элемента. Для нормальной работы элемента необходим деполяризатор, действие которого сводится к связыванию выделяющегося водорода. В качестве деполяризаторов применяются различные окислители, богатые кислородом, который может удерживать выделяющийся водород. Наиболее распространенным деполяризатором служит перекись марганца.

Очевидно, что элементы различаются между собой веществом электродов, электролитом и видом деполяризатора. Выбор электродов, электролита и деполяризатора определяет все параметры и эксплуатационные свойства элементов. Имеет также значение конструкция и технология производства элементов.

Чтобы конкретизировать ход окислительно-восстановительных процессов, рассмотрим схематическое устройство медно-цинкового элемента с жидким электролитом (рис. 2). Элемент имеет конструкцию стаканчика и состоит из стеклянного сосуда *1*, разделенного на две части перегородкой *2* из пористой (необожженной) глины. В левой части сосуда содержится насыщенный раствор медного купороса $CuSO_4$, в который погружен медный электрод, являющийся положительным электродом элемента (+); в правой части сосуда налит раствор серной кислоты H_2SO_4 с погруженным в него цинковым электродом, являющимся отрицательным (—) электродом элемента.

При разомкнутой внешней цепи элемента, когда обмен электрическими зарядами между электродами исключен, ионы, перешедшие с электродов в раствор, располагаются вблизи границы раздела металл — раствор и образуют двойной электрический слой. В этом слое начинают накапливаться электрические заряды, и довольно быстро разность потенциалов электрода и электролита настолько возрастает, что переход ионов прекращается, причем количество перенесенного ионами металла оказывается ничтожно малым.

При замкнутой внешней цепи элемента по сопротивлению нагрузки протекает ток. Цинковый электрод при этом раство-

ряется, образуя все новые порции раствора сернокислого цинка $ZnSO_4$, а на медном электроде осаждается медь из раствора медного купороса $CuSO_4$. Этот процесс обусловлен тем, что стремление перейти в раствор у ионов цинка больше, чем у ионов меди, ввиду разной концентрации валентных электронов в этих металлах. В результате цинковый электрод оказывается заряженным отрицательно, а медный — положительно. При этом состоянии равновесие, установившееся было благодаря наличию двойного электрического слоя, нарушается, и

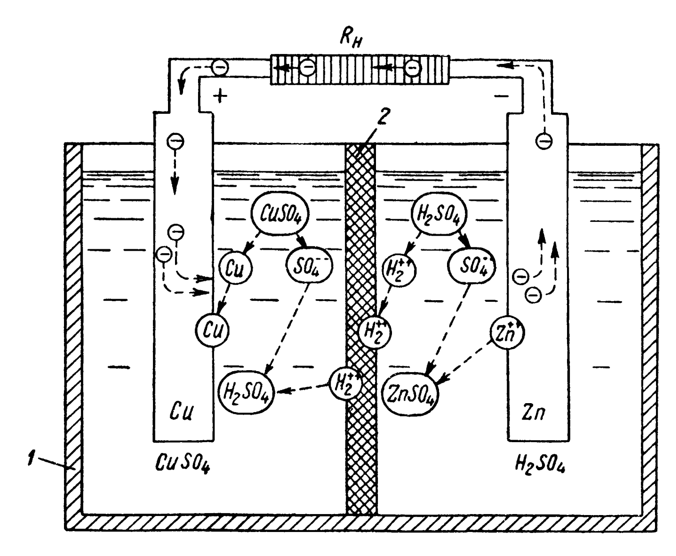


Рис. 2. Схематическое устройство медно-цинкового элемента.

электроны с цинкового электрода перемещаются по внешней цепи элемента к медному электроду.

Восстановление нарушенного равновесия создается благодаря тому, что металлический цинк переходит в раствор в виде ионов, а электрическая нейтрализация электролита сохраняется за счет движения ионов водорода сквозь пористую перегородку *2* к положительному электроду. Одновременно с этим приходящие из внешней цепи электроны нейтрализуют у положительного электрода ионы меди, которые оседают на медном электроде.

В результате окислительно-восстановительного процесса в элементе с замкнутой внешней цепью происходит непрерывное растворение цинкового электрода, сопровождающееся небольшим увеличением объема медного электрода. При этом кислотность электролита у отрицательного электрода уменьшается, а у положительного электрода увеличивается: концентрация

медного купороса понижается, концентрация раствора цинкового купороса повышается.

Разность потенциалов (электродвижущая сила) элемента $E = E_0 - E_{эл}$, где E_0 — разность потенциалов нерастворяющегося электрода (цинкового) и электролита.

У медно-цинкового элемента $E_0 = +0{,}34$ *в*; $E_{эл} = -0{,}76$ *в*; $E = +0{,}36 - (-0{,}76) = 1{,}1$ *в*.

Поляризация и деполяризация в медно-цинковом элементе сводится к следующему. Если в процессе длительной разрядки элемента не пополнять раствор медным купоросом, то наступает истощение раствора и число ионов, участвующих в реакциях, становится недостаточным. В результате этого ионы водорода направляются к положительному электроду и разряжаются на нем. Образующийся при этом свободный водород растворяется в поверхностном слое электрода и изменяет его потенциал относительно электролита. Вместо медного электрода получается как бы водородный электрод с пониженным потенциалом, т. е. становится ощутимым процесс поляризации элемента, сказывающийся в уменьшении э. д. с., причем действие поляризации прогрессирует с увеличением разрядного тока.

Если элемент разряжается небольшим током, то часть образующегося водорода успевает выделиться в окружающую среду в виде пузырьков и процесс поляризации не проявляется так заметно, как при разряде большим током. Этим объясняется характер изменения э. д. с. элементов при различных режимах разряда.

Деполяризация сводится к устранению вредного явления поляризации, т. е. к созданию условия невозможности возникновения промежуточной гальванической пары, для чего свободный водород связывается такими веществами, как двуокисью марганца, кислородом воздуха и другими веществами с избытком кислорода.

Для электрического питания переносных радиоустройств описанный медно-цинковый элемент, а равным образом и другие элементы с жидким электролитом практически непригодны. Значительно лучше применять в таких условиях эксплуатации элементы и батареи с электролитом в виде густой пасты. Правда, такой электролит обладает рядом существенных недостатков, в том числе повышенным саморазрядом, высыхает, что ограничивает срок хранения элемента и т. д.

Наряду со стаканчиковой конструкцией элементов широко используются и другие: галетные, чашечные, корончатые. Все эти элементы могут быть с различными электродами и электролитами, обладая теми или иными особенностями эксплуатации и электрическими характеристиками. В частности, в зависимости от свойств электролита элементы и батареи подразделяются на летние (Л), хладостойкие (Х) и универсальные (У). При таком подразделении элементов существенное значение имеет допустимая рабочая температура электролита.

В большинстве случаев активная масса элементов полностью не расходуется при достижении минимального разрядного напряжения. Это связано с недостаточной деполяризацией, растворимостью электрода в электролите и рядом других

причин. Поэтому некоторые типы элементов и батарей «допускают» электрическую зарядку их подобно тому, как производится зарядка аккумуляторов. При этом улучшаются условия более полного использования недорасходованной активной массы электродов. Элементы с цинковым электродом и марганцевой деполяризацией можно «подзаряжать» не более трех раз. Водоналивные элементы можно «подзаряжать» при доливе 15% водного раствора аммиака.

Типы элементов и батарей

Марганцево-цинковые элементы и батареи получили широкое промышленное распространение во всех странах мира. Внешний вид и схематическое устройство наиболее распространенных элементов и батарей отечественного производства показан на рис. 3.

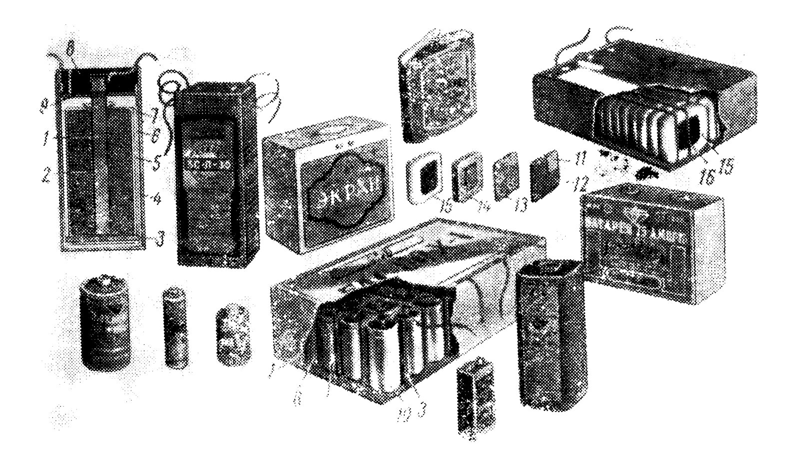


Рис. 3. Внешний вид элементов и батарей «старого» типа: стаканчиковые и галетные.

1 — угольный стержень; *2* — агломератная масса (деполяризатор); *3* — картонная изолирующая прокладка; *4* — матерчатый мешок с агломератом; *5* — желеобразный электролит; *6* — цинковый стакан; *7* — картонный футляр; *8* — битумная заливка; *9* — картонная крышка; *10* — стаканчиковый элемент; *11* — цинковая пластина; *12* — электропроводный слой, нанесенный на одной стороне, *13* — картон, пропитанный электролитом; *14* — положительный электрод; *15* — элемент в сборке, *16* — обвязка блока элементов.

В основу сокращенного названия элементов и батарей положены следующие обозначения: первые цифры указывают начальное напряжение в вольтах; следующее за цифрами буквенное обозначение указывает область применения элемента или батареи, гальваническую пару, а в некоторых

случаях конструкцию; затем через тире ставятся буквы: «У» — универсальная, «Х» — хладостойкая (если таких букв нет, то элемент или батарея предназначены для эксплуатации при летней температуре); следующие за этими буквами цифры обозначают емкость в ампер-часах *(а · ч)* (если за этими цифрами стоит буква «Ч», она обозначает число часов работы в нормальном разрядном режиме); буква «П», стоящая после цифр, обозначает «панельную» конструкцию.

Некоторые элементы и батареи, например Крона, не имеют условного обозначения.

О системе буквенных обозначений можно судить по следующим примерам:

АМЦ — анодная марганцево-цинковая (стаканчиковая);
АМЦГ — анодная марганцево-цинковая галетная;
ТМЦ — телефонная марганцево-цинковая;
ТВМЦ — телефонная воздушная марганцево-цинковая и т. д.

Несмотря на относительную простоту технологии производства и других достоинств угольно-марганцево-цинковых элементов и батарей, их принято считать устаревшими электрохимическими источниками тока в силу свойственных им следующих недостатков:

а) относительно малая удельная энергия (*а · ч/кг* или *вт · ч/кг*, *вт · ч/дм*^{3});

б) разрядное напряжение резко снижается по мере разряда элемента;

в) недостаточно полно используется активный материал элемента;

г) ограниченные пределы рабочих температур;

д) недостаточная вибростойкость, они из-за плохой герметизации чувствительны к изменениям давления и окружающей среды.

Устранение или уменьшение отмеченных недостатков, т. е. совершенствование элементов и батарей, шло по линии наилучшего сочетания новых гальванических пар, улучшения состава электролита, повышения качества конструкций и использования методов герметизации, а также новой технологии.

К элементам, предназначенным для питания транзисторных схем, относятся описываемые ниже, отличающиеся технологией изготовления и параметрами от элементов «старого» типа. К таким элементам относятся следующие.

1. Элементы с электрохимической системой цинк — двуокись марганца с солевым электролитом (МЦ). Их схематическое устройство и внешний вид показаны на рис. 4, *а* и *б* Положительный электрод *1* элемента состоит из смеси двуокиси марганца и углеродистых материалов, напрессованных на угольный стержень *2*. Отрицательным электродом служит цинковый стакан *3*, на дно которого помещена картонная шайба *4*. Носителем электролита является диафрагма *5* из кабельной бумаги, пропитанной солевым электролитом и нанесенным на нее тонким слоем пасты.

Положительный электрод вставляется в цинковый стакан с диафрагмой и слегка прессуется. Последнее характерно для набивной технологии, при которой электроды

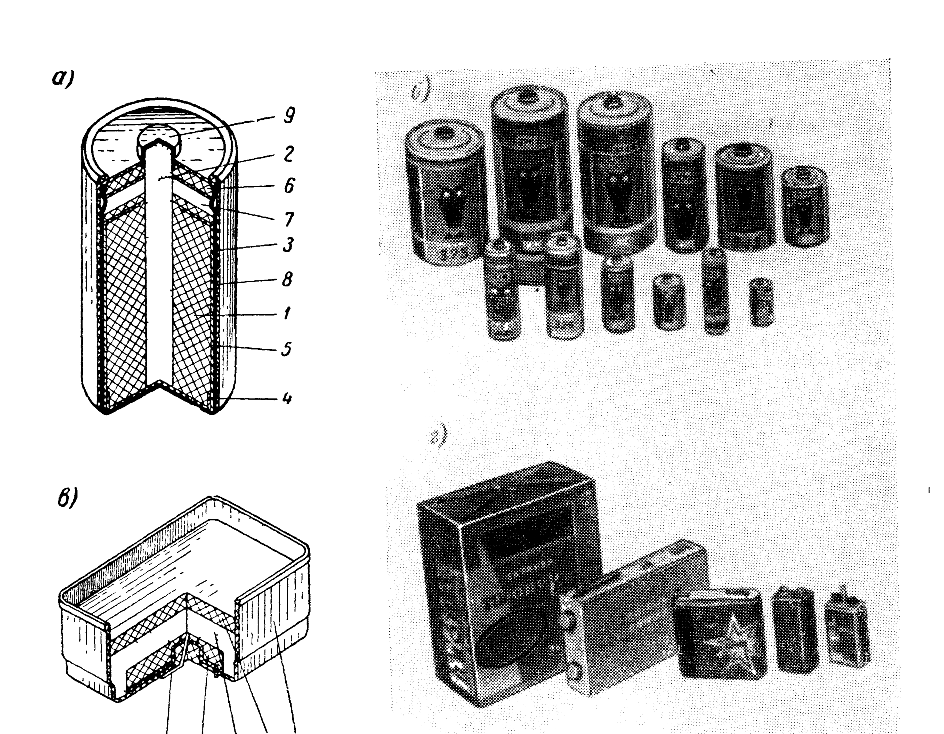


Рис. 4. Малогабаритные элементы и батареи: *а* — схематическое устройство элемента с солевым электролитом; *б* — внешний вид элементов; *в* — схематическое устройство галетной батареи со щелочным электролитом; *г* — внешний вид батарей.

сближены и количество активной массы элемента увеличивается без изменения внешних габаритов. Благодаря набивной технологии повышается работоспособность элементов в 1,5—2 раза и уменьшается внутреннее сопротивление элемента.

Данные элементов этого типа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Обозначение элемента	Средний разрядный ток, *ма*	Фактическая работоспособность, *ч*	Сохранность, *мес*	Габариты, *мм*		Вес, *Г*
				диаметр	высота	
286	3,5	75	3	10	44	10
314	3,5	120	6	14	38	15
316	3,5	170	6	14	50	20
326	3,5	240	6	16	50	25
343	200	6	12	26	49	52
373	230	23,3	12	34	62	115
374	230	26,6	12	34	75	132
376	230	35	12	34	91	166
283	3,5	28	3	10	22	5
312	3,5	60	6	14	25	10
332	150	23	6	20	37	30
336	200	7	6	20	58	45

Для герметизации элемента верхняя его часть заливается изоляционной смесью *6*. Между этой смесью и верхним торцом положительного электрода образуется газовая камера *7*. Элемент заключен в картонный футляр *8*, металлический колпачок *9* служит выводом положительного электрода.

Элементы МЦ работоспособны в интервале температур от —30 до +60°. Снижение их работоспособности в конце срока хранения составляет 15—20%. В начале разряда их э. д. с. составляет 1,6 *в*, а в конце разряда 0,9 *в*.

2. Батареи элементов типа Крона-1 и Крона-2, набранные из марганцево-цинковых элементов с применением набивной технологии, имеют начальное рабочее напряжение 9,0 *в*.

3. Малогабаритные элементы воздушно-цинковые (ВЦ) и марганцевые (МЦ) со щелочным электролитом, обладающие рядом преимуществ перед элементами старой конструкции и с солевым электролитом. Схематическое устройство галетного элемента воздушно-цинковой системы со щелочным электролитом показано на рис. 4, *в*. Элемент состоит из винипластового корпуса *1*, снабженного токоотводом *2*. На дне элемента расположен отрицательный электрод *3* из пастированного цинка (суспензия цинка в электролите), далее идут диафрагма из щелочи, сгущенной крахмалом и мукой *4*, и положительный электрод *5*. Последний выполнен из активированного угля, ацетиленовой сажи и двуокиси марганца, увлажненных раствором щелочи. Из таких элементов собирают батарею так, что один элемент вставляют в другой, после чего их обвязывают.

Основные данные батарей этого типа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование батарей	Система	Напряжение, *в*	Разрядное сопротивление, *ом*	Время работы, *ч*	Габариты, *мм*	Вес, *кГ*	Что заменяют
«Восток» анод накал сетка	ВЦ	90 1,2 7,8	15 200 2,7 1400	800	240×175××105	5,0	Комплект питания с солевым электролитом весом 16,5 *кГ*
«Полет»	ВЦ	9,0	435	2000	105×116××206	3,3	60 элементов «Сатурн»
«Пионер»	ВЦ	9,0	435	600	54×108××140	0,9	18 элементов «Сатурн»
«Крона ВЦ»	ВЦ	9,0	900	60	16×26×49	0,04	3 батареи «Крона-1»
«Синичка»	ВЦ	9,0	200	70	24×72×126	0,25	9 батарей КБС
«Финиш»	МЦ	9,0	900	100	21×26×62	0,06	Батарею 7Д-0,1
«КБС рамочной конструкции»	МЦ	4,5	15	16	22×63×65	0,2	3 батареи КБС

Окиснортутные. Окиснортутные элементы лишены многих недостатков, свойственных элементам марганцево-цинковой системы. Существенным их достоинством является устойчивое постоянство э. д. с. в течение длительного времени благодаря весьма малому саморазряду.

Окиснортутные элементы с жидким электролитом известны еще с 1884 г., но получили они широкое распространение только за последние годы благодаря усовершенствованию технологии производства и конструкции. В настоящее время имеется несколько разновидностей подобных элементов, в том числе следующие: окиснортутные элементы с цинковыми

анодами (ОР); окиснортутные элементы с индиевыми и титановыми анодами; сухие цинк-двуоксисульфатно-ртутные элементы. Из них промышленное значение и наиболее широкое применение получили первые.

Каждый элемент заключен в стальной корпус, состоящий из двух половин, разделенных изоляционной прокладкой из резины, как это показано на рис. 5. Отрицательный электрод —

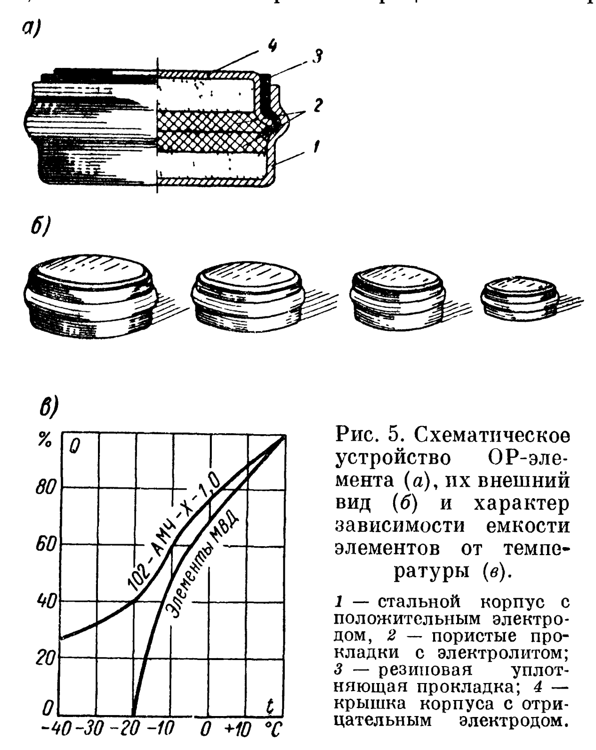


Рис. 5. Схематическое устройство ОР-элемента (*а*), их внешний вид (*б*) и характер зависимости емкости элементов от температуры (*в*).

1 — стальной корпус с положительным электродом, *2* — пористые прокладки с электролитом; *3* — резиновая уплотняющая прокладка; *4* — крышка корпуса с отрицательным электродом.

анод (крышка корпуса) содержит активную массу из цинка весьма высокой частоты (99,99%). Основание корпуса содержит активную массу положительного электрода из красной окиси ртути (85—95%) и 5—15% термически обогащенного графита, зольность которого меньше 0,2%. В качестве электролита используется 35—40%-ный раствор едкого кали (КОН), содержащий около 5% растворенной окиси цинка В некоторых типах окиснортутных элементов используется загущенный электролит, приготовляемый добавкой к электролиту 1,5—4% карбооксиметилцеллюлозы.

Сборка элементов производится запрессовкой под небольшим давлением и герметизируется закаткой края основания корпуса. Герметизация получается достаточно хорошей и при

хранении элементов в течение 1—2 лет не наблюдается снаружи следов щелочного раствора. Незначительные следы солей, появляющиеся у резиновой прокладки, не опасны для близко расположенных элементов радиоаппаратуры. Однако герметизация должна быть не очень жесткой, способной пропускать наружу скапливающиеся количества водорода, образующегося при разряде элемента. Активные массы электродов разделены пористой диафрагмой, пропитанной электролитом, не позволяющей массам электронов передвигаться и не препятствующей движению электрических зарядов Благодаря такой конструкции достигается большая вибростойкость элементов и батарей, составленных из них набором в столбик с нужным напряжением. Весь столбик элементов обычно изолируется органической пленкой.

О сравнительной вибростойкости окиснортутных элементов можно судить по тому, что они выдерживают перегрузку с ускорением до 200 *g*, а обычные гальванические элементы медно-цинковой системы — до 25 *g*. Считается, что источники тока переносной радиоаппаратуры должны выдерживать удары с ускорением в (7—8) *g*, а для радиооборудования автомобилей до (25—40) *g*.

Для большинства типов гальванических элементов нежелательна температура окружающей среды свыше +40° С и ниже —30° С, так как емкость элементов резко меняется с изменением температуры. О характере изменения емкости электрохимических источников тока с температурой можно судить по характеристикам рис. 5, *в*.

Окиснортутные элементы обычно предназначены для работы при положительных температурах. Их расчетная емкость сохраняется при температуре не выше +50° С, причем осуществляется 100%-ное использование активных материалов. При температуре 0° С активные материалы используются только на 80%, а при пониженной температуре емкость элементов заметно уменьшается. В литературе имеются указания, что окиснортутные элементы продолжают действовать даже при температуре до +93° С. Как правило, работоспособность элементов, т. е. сохранение емкости и э. д. с., зависит в сильной мере от тщательности герметизации и технологии изготовления активных масс.

Если окиснортутный элемент эксплуатируется при низких температурах и практически отдал полностью номинальную емкость, то при подогреве может быть восстановлена его работоспособность за счет более полного использования активной массы.

Окиснортутные элементы сохраняют постоянство разрядного напряжения длительное время, если их разряжают при малом разрядном токе. Спустя некоторое время после изготовления э. д. с. элемента достигает 1,353—1,351 *в*. Конечное напряжение при интенсивных режимах разряда равно 0,9 *в*. При этом почти полностью используются активные вещества элемента. При менее напряженных режимах разряда конечное напряжение равно 1,0—1,05 *в*. Более точно можно судить о режимах работы элементов по характеристикам, приведенным на рис 6.

На рис. 6, *а* показаны зависимости напряжения элемента типа ОР-2к от температуры при различных токах разряда. Пользуясь этими характеристиками, можно определить сопротивление элемента переменному и постоянному току при разных температурах: в пределах температуры +(20—50)° С и при токе нагрузки 10—20 *ма* сопротивление переменному току мало, сопротивление постоянному току соответственно равно 5,0 и 5,5 *ом*.

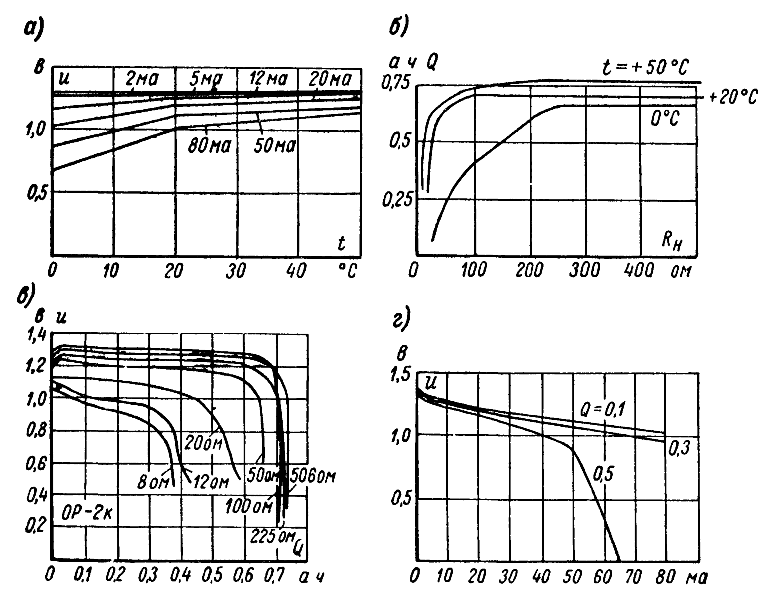


Рис. 6. Характеристики элемента ОР-2к: *а* — зависимость разрядного напряжения от температуры при разных токах нагрузки; *б* — зависимость емкости от сопротивления нагрузки; *в* — зависимость разрядного напряжения от емкости; *г* — зависимость разрядного напряжения от разрядного тока.

На рис. 6, *б* показаны зависимости отдаваемой элементом емкости от сопротивления нагрузки при разных температурах. Из этих кривых видно, что при больших сопротивлениях нагрузки (малом токе) увеличивается отдаваемая емкость. На основании этого можно сделать вывод, что *окиснортутные элементы наилучшим образом эксплуатируются при длительном разряде малыми токами.* Этот же вывод можно сделать и на основании характеристик рис. 6, *в*, на котором показаны зависимости разрядного напряжения от отдаваемой емкости при разных сопротивлениях нагрузки. Отсюда же можно сделать вывод о *пригодности элементов ОР для использования в качестве источников «неизменного» (опорного) напряжения.*

Примерно такой же вывод можно сделать и на основании характеристик элемента ОР-2к (рис. 6, *г*).

Данные окиснортутных элементов отечественного производства приведены в табл. 3.

Таблица 3

Тип элемента	Емкость, *а·ч*	Режим разряда		Размеры, *мм*		Вес, *Г*	Сохранность, мес.
		сопротивление нагрузки, *ом*	продолжительность разряда, *ч*	диаметр	высота		
ОР-1	0,6	120	50	15,6	12,6	9,0	18
ОР-1к	0,2	120	18	15,6	6,3	4,5	9
ОР-2	1,1	60	50	21,6	13,1	19,0	18
ОР-2к	0,5	60	23	21,0	7,4	9,5	12
ОР-3	1,8	40	50	25,7	13,5	30	18
ОР-3к	1,0	40	27	25,7	8,4	18,0	12
ОР-4	2,8	25	50	30,1	14,1	40,0	18
ОР-4к	1,6	25	32	30,1	9,4	28,0	12

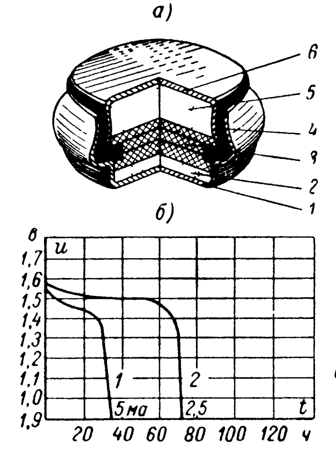
Использование индиевых и титановых электродов в ртутных элементах обусловлено, главным образом, стремлением упростить конструкцию за счет упрощения герметизации, ибо при таких электродах не потребуется выпускать наружу водород. Кроме того, в окиснортутных элементах за счет недостаточно жесткой герметизации, необходимой для выпуска наружу водорода, происходит частичное высыхание электролита и ухудшение электрических параметров элемента.

Индиево-ртутные элементы подобно цинко-ртутным элементам обладают плавной разрядной характеристикой и сохраняют э. д. с. с большим постоянством в течение 20 месяцев (изменения э. д. с. составляют 0,01 *в*). Эти элементы сохраняют работоспособность при температуре от —40 до +70° С. Их преимущественное применение, как указывается в литературе, ограничено такими приборами, как наручные электрочасы. Весьма маловероятно их широкое промышленное распространение из-за сравнительно высокой стоимости индия и необходимости улучшения его механических свойств за счет введения присадок висмута и свинца.

Одна из современных разновидностей окиснортутных элементов производится под маркой РЦ (ртутно-цинковые). Их широко применяют для питания малогабаритной радиоаппаратуры, измерительных приборов, медицинской аппаратуры. Устройство этих элементов такое же, как и элементов ОР, а технология производства несколько изменена.

Схематическое устройство РЦ-элемента показано на рис. 7, *а*. Активную массу *2* запрессовывают в железный корпус элемента *1*, активный материал отрицательного электрода *5*, состоящий из цинкового порошка, красной окиси ртути и графита запрессовывают в крышку *6* элемента. Между электродами помещают фильтровальную бумагу *3*, пропитан-

ную электролитом. Корпус и крышка элемента, служащие одновременно и токоотводами, изолированы друг от друга резиновым кольцом 4. Элементы герметизируются штамповкой.



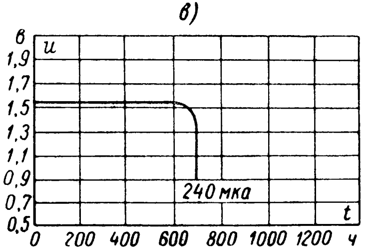


Рис. 7. Схематическое устройство РЦ-элемента (*а*), разрядные характеристики серебряно-окисных элементов пуговичной конструкции (*б—в*).

Основные параметры РЦ-элементов, внедренных в производство, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Название элемента	Емкость, *а · ч*	Разрядный ток, *ма*	Сохранность, год	Размеры, *мм*		Вес, *Г*
				диаметр	высота	
РЦ11	0,02	0,15	0,5	4,7	5,0	0,5
РЦ13	0,02	0,15	0,5	6,0	3,5	0,45
РЦ15	0,04	0,30	0,5	6,3	6,0	0,85
РЦ31	0,07	0,1	1,0	11,5	3,6	1,30
РЦ32	0,05	2,0	0,5	11,0	3,5	1,30
РЦ53	0,20	10,0	1,0	15,6	6,3	4,60
РЦ55	0,60	10,0	2,5	15,6	12,5	9,5
РЦ57	1,0	20,0	1,0	16,0	17,0	15,0
РЦ59	3,0	60,0	1,0	16,0	50,0	44,0
РЦ63	0,55	20,0	1.5	21,0	7,4	10,5
РЦ65	1,2	20,0	2,5	21,0	13,0	18,1
РЦ73	1,0	30,0	1,5	25,5	8,4	17,2
РЦ75	1,7	30,0	2,5	25,5	13,5	27,0
РЦ82	1,5	50,0	1,5	30,1	9,4	30,0
РЦ83	1,5	50,0	1,5	30,1	9,4	28,2
РЦ83х	1,5	50,0	1,0	30,1	9,4	28,2
РЦ84	2,5	50,0	2,5	30,1	14,0	45,0
РЦ85	2,5	50,0	2,5	30,1	14,0	39,5
РЦ85х	2,5	50,0	1,5	30,1	14,0	39,5
РЦ93	13,0	300	0,5	31	60	170

Элементы РЦ83х и РЦ85х рассчитаны для работы в интервале температур от —30 до +50° С, все остальные от 0 до +50° С. Как в окиснортутных, так и в РЦ-элементах напряжение разряда изменяется в процессе разряда незначительно при нормальном разрядном токе. Например, у элемента РЦ65 напряжение изменяется от 1,30 *в* в начале разряда до 1,26 *в* к концу разряда, т. е. перепад напряжений составляет 3,1% при токе нагрузки 2,0 *ма*. С увеличением разрядного тока снижаются номинальное напряжение и емкость элемента.

Медноокисные. Медноокисные элементы известны еще с 1881 г. В настоящее время — это достаточно распространенные электрохимические источники тока сравнительно большой мощности, о чем можно судить по тому, что в послевоенные годы в США ежегодно производится более 1,5 млн. элементов с емкостью от 75 до 1000 *а · ч*.

Наиболее распространенным положительным электродом медноокисных элементов является спеченный пористый брикет пластинчатой формы, состоящий из окиси меди со связующим жидкообразным веществом (жидким стеклом). В некоторых случаях используются положительные электроды из порошкообразной меди и ее окиси с выгорающим связующим веществом. Отрицательными электродами служат цинк или электрод, изготовленный отливкой из сплава цинк — ртуть.

Электроды монтируются в блоках с попеременным расположением разнополярных пластин на расстоянии 4—8 *мм* друг от друга. Блок элемента крепится к крышке сосуда, который чаще всего изготовляется стеклянным, что дает возможность видеть, насколько растворен отрицательный электрод в процессе работы элемента. При этом обычно ограничителем емкости элемента выбирается положительный электрод, а цинковый электрод делается с 20—30%-ным запасом, что улучшает его механическую прочность. Наиболее распространенным электролитом является раствор едкого натра.

Электродвижущая сила элемента колеблется в пределах от 0,96 до 0,88 *в* при среднем разрядном напряжении 0,7—0,5 *в*. Срок службы элемента 10—15 лет, удельная энергия 35—40 *вт · ч/л* и 25—35 *вт · ч/кГ* В некоторых батареях достигнуты значения удельной энергии более 50 *вт · ч/кГ*.

Медноокисные элементы применяются в стационарных условиях, обеспечивая высокую надежность действия в течение весьма длительного времени, являясь одновременно относительно дешевыми источниками тока. Их часто применяют в установках сигнализации и связи железнодорожного транспорта, в автоматических телефонных станциях и других установках, где требуется заметно большая мощность. В установках электропитания радиоустройств медноокисные элементы (МОЭ) почти не применяются.

Серебряноокисные. Серебряноокисные элементы пуговичной конструкции обеспечивают возможность устойчивой работы при отрицательных температурах и вполне приемлемые характеристики в широких пределах положительных температур. В этих элементах используется цинковый анод с большой полезной площадью, сильно щелочной электролит из

гидроокиси натрия или гидроокиси калия и катод из окиси серебра Ag_2O. Номинальное рабочее напряжение элемента 1,5 *в*, а емкость элемента в миниатюрном исполнении менее 0,165 *а·ч* при удельной энергии 110 *вт·ч/кГ*.

Разрядные характеристики серебряноокисных элементов, используемых для электропитания слуховых аппаратов и наручных электрочасов, показаны на рис. 7, *б* — *в*. Эти характеристики относятся к экспериментальным сериям элементов, выпускаемых в США. Из рис. 7 видно, что элементам присущи следующие свойства: стабилизация потребляемого тока при неизменном сопротивлении нагрузки составляет ±5% в течение всего цикла разряда и ±2% в течение длительной части разрядного цикла. При малом токе нагрузки изменение напряжения менее ±0,5% в течение длительного времени разряда, внутреннее сопротивление мало и остается постоянным в течение всего полезного периода разряда.

Ленточные электрохимические батареи. Ленточные батареи являются одной из разновидностей таких источников тока, которые должны расходовать активные вещества только в то время, когда имеется непосредственная надобность в питании радиоустройств. Прототипом таких батарей можно считать широко известные водоналивные элементы, имеющие «сухой» электролит. Такие элементы не расходуют активных веществ и не создают ток в нагрузке, если их не залить водой.

Одна из ленточных батарей, предназначенная по литературным данным для использования на космических кораблях, обладает высокой удельной энергией, и имеется возможность длительного хранения ее в нерабочем состоянии.

В такой батарее имеется пористая ионообменная мембрана (лента) практически бесконечной длины, на одну из сторон которой нанесен материал анода, а на другую — материал катода. Электролит заключен в микрокапсулы, помещающиеся с одной или обеих сторон ленты. В рабочем состоянии батареи, т. е. когда ее используют как источник тока, лента принудительно перематывается с помощью лентопротяжного механизма с одной катушки на другую — приемную, с которой она может быть затем удалена по мере надобности. При протягивании ленты между двумя металлическими валками, служащими токосъемными электродами, микрокапсулы разрушаются и освобождающимся электролитом пропитывается лента, чем батарея приводится в действие. Так как электрохимический процесс начинается спустя некоторое время после пропитки, то дробильные валки сконструированы так, что есть некоторое время упреждения между моментом разрушения капсул и снятием тока.

Как указывается в литературе, созданы несколько экспериментальных образцов лент, отличающихся между собой конструкцией. В одной из моделей ленточных батарей используется перекись серебра и цинк, а в качестве электролита — гидроокись калия. В результате химической реакции происходит восстановление металлического серебра из перекиси серебра. В другой модели батареи используется магний и метадинитробензол и перхлорат магния в качестве электролита.

В описываемых моделях ленточных батарей достигается большая удельная мощность, превышающая удельную мощность серебряно-цинковых аккумуляторов. Толщина ленты составляет 0,125—0,25 *мм*. Мощность, расходуемая на протяжку ленты, составляет около 50 *мвт* при выходной мощности батареи около 1300 *мвт*. Опытные образцы ленточных серебряно-цинковых батарей обеспечивает э. д. с. 1,86 *в*, разрядное напряжение 1,4 *в* при токе нагрузки 1,5 *а/см*^{2} ленты.

Описываются также ленточные батареи, в которых имеются одновременно действующие две ленты: одна с покрытием из перекиси серебра, другая — несущая электролит (раствор едкого кали). Стационарная цинковая пластина служит одновременно и коллектором тока. Обе ленты приводятся в соприкосновение непосредственно перед прохождением под неподвижным электродом. При такой конструкции батареи лента, пропитанная электролитом, должна находиться в закрытой кассете.

Серебряно-цинковые наливные элементы. Серебряно-цинковые наливные элементы относятся к источникам тока одноразрядного действия, которые принято называть резервными. Такие источники тока находятся в заряженном состоянии, но начинают действовать лишь после того, как их заливают электролитом. Положительный электрод таких элементов состоит из окиси серебра, отрицательный — из металлического цинка. Обычно в современных конструкциях таких элементов электролит находится в отдельном металлическом цилиндре, соединенном с одной стороны с батареей элементов, куда должен быть залит электролит, а с другой стороны — с баллоном со сжатым газом. Соединительный клапан между баллоном с газом и цилиндром с электролитом может быть разрушен (приведен в действие) в заданный момент времени различными способами. Одним из описываемых в литературе способом является применение пирозапалов, взрывающихся при замыкании вспомогательной электрической цепи. Такое замыкание цепи может быть осуществлено на расстоянии кодированным радиосигналом. После взрыва пирозапалов газ устремляется в цилиндр с электролитом, выжимает его по соединительным трубкам в батареи, и спустя несколько секунд батарея начинает действовать как источник тока. Для работы в условиях низких температур предусмотрен электрический подогрев электролита от вспомогательных источников тока. Вся конструкция выполнена весьма компактной, и удельная энергия батарей достаточно высока.

Сравнительные характеристики первичных источников тока

Для сравнения и оценки современных гальванических элементов и батарей различных типов как отечественного, так и зарубежного производства можно воспользоваться данными табл. 5 и 6.

Таблица 5

Тип элемента и режим его использования	Э.д.с., *в*	Разрядное напряжение, *в*	Рабочий интервал температуры, °С	Удельные характеристики	
				вт×*ч/кГ*	*вт·ч/л*
Марганцево-цинковые батареи 3,7-ФМЦ-0,5	—	3,7	—20—+40	8	15
Стаканчиковый элемент МЦ	1,5	1,3—1,1	—20—+40	46	76
Галетные батареи ГБ в длительном режиме	1,5	1,3—1,0	—20—+40	50	76
Марганцево-магниевый элемент в длительном режиме разряда	1,8	1,4—1,5	—30—+55	97	200
Меднокислый элемент в длительном режиме разряда	0,6	0,7—0,5	—40—+60	52	35
Окиснортутный элемент типа ОР	1,35	1,3—0,9	—5—+70	80—110	300 150
Свинцово-цинковый элемент	2,45	2,4—2,1	—1—+30	27	81
Свинцово-кадмиевый элемент	2,4	2,1—1,8	—30—+50	20	44
Хлорно-свинцовый элемент	2,2	2,0	—5—+30	127	46
Серебряно-магниевый элемент	2,1	1,8	—40—+80	55	61
Медно-магниевый элемент	1,7	1,2—1,4	—50—+60	40	83
Серебряно-цинковый элемент	1,84	1,5—1,4	—40—+60	70	200
Серебряно-окисный элемент	1,8	1,5	—40—+60	110	170
Воздушно-цинковый в режиме длительного разряда	1,4	1,25—1,0	—35—+40	60	73
Марганцево-воздушно-цинковый элемент в режиме длительного разряда	1,3	1,1	—20—+40	55	105

Примечание. В таблице указано *вт·ч/л*, что равно *вт·ч/дм*³.

Таблица 6

Наименование элемента	Страна-изготовитель	Сокращенное название	Э д. с., *в*	Разрядное напряжение, *в*	Сопротивление нагрузки, *ом*	Мощность, *вт·ч*
Цилиндрический FMS 97	Венгрия	R20	1,61	1,27	30	3,22
Цилиндрический . . .	Китай	R20	1,57	1,23	30	1,97
Цилиндрический . . .	Югославия	R20	1,56	1,26	30	2,45
Накальный 5044 . . .	Чехословакия	R20	1,58	1,23	30	1,87
Низкотемпературный элемент	Чехословакия	R20	1,48	1,28	30	2,65
Накальный	ГДР	R20	1,58	1,27	30	3,25
Накальный	ГДР	R20	1,72	1,31	30	4,25
Герметичный 212. . .	ФРГ	R20	1,5	1,24	30	1,9
Накальный 231 . . .	ФРГ	R20	1,58	1,26	30	3,93
Цилиндрический 202	ГДР	R10	1,55	1,15	55	0,23
Цилиндрический 231	ГДР	R6	1,45	1,21	150	0,4
Цилиндрический 200	ГДР	R3	1,45	1,18	500	0,19
Элемент KP1	Польша	MP7	1,35	1,21	50	1,55
Элемент KM1	Польша	MR7	1,35	1,22	50	1,26
Батарея B1aT6. . . .	ГДР	4R25	6,4	4,88	60	22,3
Батарея 304	ГДР	15F20	22,5	17,8	22 500	0,48
Анодная батарея 72	ФРГ	1F20	24,6	17,2	22 500	1,75

Примечания 1. Все цилиндрические элементы удовлетворяют требованиям взаимозаменяемости, и их размеры соответствуют международным стандартам.

2. Все элементы таблицы относятся к угольно-цинковым.

3. Длительно отдаваемая мощность равна произведению среднего разрядного напряжения на емкость, определяемую при +20° С.

2. АККУМУЛЯТОРЫ

Общие сведения

Аккумуляторы — вторичные электрохимические источники тока — в состоянии создавать электрический ток и выделять в нагрузке энергию лишь после их предварительной зарядки от постороннего источника тока. Для них типичен цикл зарядка — разрядка, который многократно повторяется. При зарядке в них аккумулируется электрическая энергия, при разрядке расходуется. В качестве нагрузки

служат, в частности, транзисторные радиоприемники, слуховые аппараты, переносные малогабаритные телевизоры и другая радиоэлектронная аппаратура. Мощные аккумуляторные батареи используются также для питания автоматических телефонных станций, телеграфа, подводных лодок и многих других потребителей энергии постоянного тока.

Действие аккумуляторов, как и гальванических элементов, основано на обмене электронов между материалами электродов при активном участии электролита. Поэтому аккумуляторы классифицируются по виду электролита (кислотные, щелочные), по материалу электродов (свинцовые, кадмиево-никелевые, серебряно-цинковые и др.), по конструкции (ламельные, безламельные, герметизированные и др.).

В аккумуляторах осуществляется окислительно-восстановительные процессы при замкнутой внешней цепи. При зарядке аккумуляторов в процессе электролиза на положительном электроде протекает реакция окисления, а на отрицательном — реакция восстановления. При разрядке на электродах протекают обратные реакции: на положительном — реакция восстановления, на отрицательном — процесс окисления. Таким образом, окислительно-восстановительные процессы в аккумуляторах обратимы, чем и объясняется многоразовое их использование.

Ниже в качестве примера обратимости окислительно-восстановительных процессов приводится описание действия кислотного (свинцового) аккумулятора.

Положительный электрод кислотного аккумулятора состоит из свинцовых пластин, покрытых слоем двуокиси свинца PbO_2; отрицательный электрод состоит из чистого свинца, находящегося в сильно раздробленном состоянии (губчатый свинец). Оба электрода помещены в сосуд, заполненный электролитом, роль которого исполняет раствор серной кислоты в дистиллированной воде. В результате взаимодействия серной кислоты с окислами свинца на электродах образуется тонкий слой сернокислого свинца (сульфат свинца).

В процессе зарядки аккумулятора, когда его подключают к источнику постоянного тока, происходит окислительно-восстановительный процесс, сернокислый свинец на положительных электродах превращается в двуокись свинца, а на отрицательных электродах — в свинец. В процессе разрядки аккумулятора при замкнутой внешней цепи двуокись свинца положительных пластин, взаимодействуя с серной кислотой, восстанавливается в металлический свинец.

Одновременно с изменением состава электродов аккумулятора изменяется концентрация серной кислоты: при зарядке она повышается, при разрядке — снижается. Это объясняется тем, что в растворе серной кислоты происходит диссоциация (распадание) молекул на положительные ионы водорода и отрицательные ионы остатка серной кислоты.

Подобные окислительно-восстановительные реакции протекают во всех аккумуляторах, и их различие заключается только в том, что применяются различные материалы электродов, разные электролиты и конструкции. При этом меняется

э. д. с., разрядное напряжение, емкость, внутреннее сопротивление и ряд других эксплуатационных свойств.

В широко распространенных щелочных кадмиево-никелевых ламельных (КН) аккумуляторах положительные и отрицательные электроды собраны из тонких пластин никелированной стали, на которые напрессованы брикеты с активной массой (ламели). Активная масса положительных пластин состоит из гидроокиси никеля $Ni(OH)_3$, который для увеличения электрической проводимости смешан с графитом. Активная масса отрицательных пластин содержит кадмий и железо. Брикеты активной массы помещены в перфорированные стальные оболочки, а пластины сварены между собой с зазором в 1—1,5 *мм,* чтобы обеспечить доступ электролита к активной массе. Чтобы предохранить пластины от плотного прилегания друг к другу, между ними помещены изолирующие прокладки (сепараторы).

Щелочные кадмиево-никелевые безламельные (КНБ) аккумуляторы отличаются отсутствием в них ламелей. Пластины КНБ-аккумуляторов изготовлены напрессовкой порошкообразной массы на стальную рамку с последующей формовкой, в процессе которой им придают необходимую пористость и прочность. В таких аккумуляторах площадь соприкосновения активной массы с электролитом больше, чем у ламельных. В результате удельная мощность в безламельных аккумуляторах выше, чем у ламельных, и они обладают рядом других полезных эксплуатационных свойств, если не считаться с тем, что их механическая прочность и долговечность меньше, чем у ламельных.

Новые разработки аккумуляторов ведутся в направлении увеличения удельной энергии и надежности, долговечности и расширения диапазона рабочих температур, улучшения эксплуатационных свойств.

Из маломощных аккумуляторов, разработанных и внедренных в промышленность за последние годы, особое внимание привлекают малогабаритные дисковые и цилиндрические герметизированные, безламельные и специальные типы аккумуляторов, отличающиеся высокой удельной энергией и хорошими эксплуатационными свойствами.

Типы аккумуляторов

Кадмиево-никелевые безламельные. Кадмиево-никелевые безламельные аккумуляторы почти вытеснили другие конструкции благодаря высокой удельной энергии, надежности в работе, возможности их применения при достаточно низкой температуре, относительно малому внутреннему сопротивлению, обеспечивающему надежное питание радиоустройств с импульсным режимом работы и с большими кратковременными перегрузками. Немаловажное значение имеет то, что в КНБ-аккумуляторах использована относительно новая конструкция: корпусы сосудов, вентиляционные пробки, сепараторы и некоторые другие мелкие детали аккумуляторов изготовлены из пластических масс. Это позволяет уменьшить

коррозию и саморазряд аккумулятора, сводя к минимуму паразитные утечки и случайные короткие замыкания через металлические части, как это имеет место в ламельных КН и ЖН-аккумуляторах старой конструкции.

Внешний вид КНБ-аккумуляторной батареи и ее схематическое устройство показаны на рис. 8.

КНБ-аккумуляторы, предназначенные для эксплуатации в интервале температур от —20 до +40° С, заливаются состав-

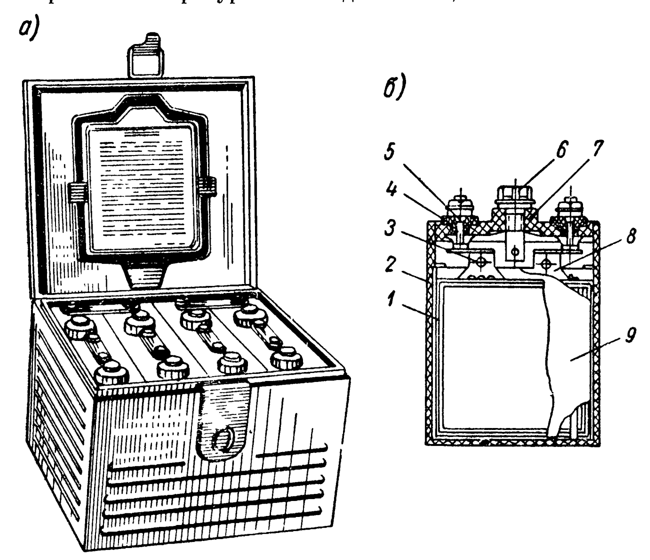


Рис. 8. Безламельный кадмиево-никелевый аккумулятор: *а* — внешний вид; *б* — схематический разрез.

1 — пластмассовый моноблок; *2* — изоляционное ребро; *3* — блок положительных пластин; *4* — резиновая втулка; *5* — шайба; *6* — пробка; *7* — крышка аккумулятора; *8* — блок отрицательных пластин; *9* — капроновая ткань.

ным электролитом, в котором на 1 *л* раствора едкого кали плотностью 1,19—1,25 приходится 20 *Г* гидроокиси лития. Если аккумуляторы эксплуатируются при температуре ниже —20° С, то применяют электролит повышенной плотности (1,26—1,28). В аккумуляторах, эксплуатируемых при температуре от —40 до +40° С электролит меняют через каждые 50 циклов зарядка — разрядка. Гарантийный срок службы аккумуляторов равен 150—200 зарядно-разрядным циклам.

Саморазряд КНБ-аккумуляторов за 30 суток хранения в заряженном состоянии составляет 18—10%, что соизмеримо с саморазрядом КН-аккумуляторов. Срок сохранности аккумуляторов с залитым электролитом в незаряженном состоянии весьма велик и зависит от условий консервации металлических частей (гаек, перемычек и т. п.).

В нормальных условиях эксплуатации аккумуляторов их не следует разряжать до напряжения ниже 1,0 *в*, чтобы не оказывать вредного действия на сохранность электродов. В некоторых случаях в ущерб срока службы аккумуляторы разряжают и до более низкого напряжения.

Основные данные некоторых КНБ-аккумуляторов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Обозначение	Число аккумуляторов	Напряжение, *в*		Ток разряда, *а*	Емкость, *а·ч* при		Габариты, *мм*	Вес, *кГ*
		номинальное	в конце разряда		+20° С	—40° С		
2КНБ-2	2	2,52	1,8	0,4	2	1,2	36 · 36 · 92	0,2
2КНБ-15	4	5,0	4,0	5,0	15	5,5	112 · 83 · 125	2,1
2КНБ-20	2	2,52	2,0	5,0	20	7,0	163 · 44 · 127	1,6
4КНБ-20	4	5,0	4,0	6,5	20	7,0	180 · 93 · 127	3,2
4КНБ-25	4	5,0	4,0	6,5	25	12,0	180 · 151 · 132	5,8
8КНБ-25	8	10,0	8,0	7,5	25	16,0	190 · 180 · 135	7,5
10КНБ-60	10	12,5	10,0	15,0	60	30	450 · 178 · 225	30

Из сопоставления данных табл. 7 видно, что емкость аккумуляторов уменьшается почти в два раза при снижении температуры до —40° С. Разряд аккумулятора обычно длится 5—6 *ч*, но допускается и более длительная разрядка меньшим разрядным током; точно так же меняется и длительность зарядки. При этом надо учитывать наименьшие коэффициенты отдачи по емкости в зависимости от режима зарядки и разрядки аккумулятора.

Сопоставляя, например, батарею 2КНБ-20 с ламельными аккумуляторами батареи 2ФКН-8П, можно заметить:

1) 2КНБ-20 по объему на 45% больше и по весу на 10% больше, чем 2ФКН-8П;

2) 2КНБ-20 имеет номинальную емкость в 2,5 раза большую, чем батарея 2ФКН-8П, или, что то же самое, у ламельных аккумуляторов удельная энергия почти в 1,75 раза ниже, чем у безламельных; эти соотношения сохраняются почти у всех типов безламельных аккумуляторов.

Кадмиево-никелевые с пористыми пластинами. По своей конструкции кадмиево-никелевые аккумуляторы с пористыми пластинами сходны с обычными КН-аккумуляторами. Различаются они лишь в технологии изготовления активной массы электродов. В литературе такие аккумуляторы называют также «аккумуляторы со спеченными электродами». Очевидно, что в зависимости от технологии «спекания электродов» могут быть различные фирменные названия аккумуляторов. Во всех подобных аккумуляторах в основном устранены недостатки КН-аккумуляторов.

В послевоенные годы аккумуляторы с высокопористыми электродами освоены промышленностью СССР, США, Франции

и некоторых других стран. В литературе приведен ряд описаний технологических приемов изготовления таких аккумуляторов.

Электроды описываемых аккумуляторов представляют собой плоские основы из спеченного никелевого порошка с пористостью до 80%, пропитанные гидратом закиси никеля для положительного электрода и гидроокисью кадмия для отрицательного электрода. Обычно электроды выполняются тонкими (до 0,4 *мм* толщины) и междуэлектродные промежутки (между отдельными пластинами) доведены до 0,15—0,2 *мм*. В качестве электролита используется, например, раствор углекислого калия. Возможны и другие электролиты.

В литературе на основании экспериментов ряда промышленных организаций указывается, что наиболее пригодной основой для спекания электродов может служить порошок карбонильного никеля, изготовляемого путем разложения в особых условиях газообразного карбонила никеля Такой порошок состоит из крупинок металла диаметром в несколько микрон, сцепленных друг с другом металлическими волокнами длиной в несколько десятых миллиметра. При высокой температуре и соответствующей атмосфере с пониженным давлением эти частицы спекаются между собой и создают основу с пористостью до 80%. Полученные основы подвергаются дальнейшей обработке, которая заключается во введении в основы электродов активных веществ положительных и отрицательных пластин.

Одной из фирменных разновидностей кадмиево-никелевых аккумуляторов с пористыми пластинами являются аккумуляторные батареи «Вольтаблок» французской фирмы. Внутреннее сопротивление этих аккумуляторов в 5—10 раз ниже, чем у обычных ламельных КН-аккумуляторов. Благодаря малому внутреннему сопротивлению аккумулятора «Вольтаблок» допускают кратковременные перегрузки, в 10—20 раз большие нормального разрядного тока.

По литературным данным аккумуляторная батарея (20 аккумуляторов) с пористыми пластинами общей емкостью 35 *а·ч* обеспечивала через каждые 10 *сек* разрядный ток 150 *а*; после зарядки эта батарея обеспечивала разрядный ток 300 *а* при длительности импульсов 3 *сек* и интервалами между импульсами 10 *сек*.

Э. д. с. аккумулятора зависит от технологии его изготовления. В описываемом аккумуляторе э. д. с. достигала 1,65 *в*, а напряжение после 5 *ч* разрядки нормальным разрядным током составляло 1,15 *в*.

Аккумуляторы со спеченными электродами обладают удельной энергией до 30 *вт·ч/кГ* или 85 *вт·ч/л*, надежно работают при температуре —30° С, и сохраняют работоспособность с пониженной отдачей емкости вплоть до —54° С; они допускают кратковременный заряд (80% номинальной емкости за 2 *ч* зарядки).

Аккумуляторам с пористыми электродами свойствен еще целый ряд достоинств. Однако из-за сложности технологии их производства они не находят широкого распространения, как некоторые другие типы аккумуляторов.

Герметичные кадмиево-никелевые. Как указывалось выше, эксплуатация аккумуляторов почти всех систем сопровождается газовыделением в конце их заряда и в процессе как самого заряда, так и при хранении за счет саморазряда Поэтому в таких аккумуляторах имеются специальные отверстия для выхода газов. Выделяющиеся газы захватывают с собой капли электролита и вредно действуют на близко расположенные части радиоэлектронной аппаратуры. Это особенно сильно заметно, когда применяются малогабаритные радиоустройства с весьма плотным монтажом, какой имеет место, например, в транзисторных радиоприемниках, слуховых аппаратах и др. Имеются другие неприятные последствия газовыделения: изменение состава электролита, его высыхание и т. д. В результате за такими аккумуляторами требуется тщательный повседневный уход во избежание ухудшения их эксплуатационных и электрических данных.

Способность кадмиево-никелевых аккумуляторов заряжаться при малых зарядных токах с малым газовыделением натолкнула на мысль о создании маломощных герметизированных аккумуляторов и батарей. При этом изыскивались возможности поглощения выделяемых малых количеств газа, в частности водорода, активными веществами электродов. Такой способностью, оказалось, обладает только кадмиево-никелевая система. Возможно, что в ближайшем будущем будут разработаны и другие электрохимические системы.

Герметичные кадмиево-никелевые аккумуляторы создаются таким образом, чтобы ограничить в них выделение водорода Для этого ограничивают емкость окисноникелевого электрода и зарядку аккумулятора производят при напряжениях меньших 1,5 *в*. В конце заряда такого аккумулятора на положительном электроде выделяется кислород, окисляющий губчатый кадмий и ограничивающий выделение водорода.

Скорость поглощения газообразного кислорода кадмиевым электродом как бы предопределяет возможный режим зарядки аккумулятора. Чем энергичнее реагирует кислород с активной массой, тем быстрее может быть зарядка аккумулятора без опасности выделения водорода. При этом скорость реагирования кислорода зависит от конструкции электрода, температуры и давления. Лучше всего реагирует кислород со спеченным кадмиевым электродом, который чаще всего используется в герметизированных аккумуляторах.

Малогабаритные герметизированные аккумуляторы дисковой, цилиндрической и прямоугольной форм показаны на рис. 9. Дисковый аккумулятор (рис. 9, *б*) смонтирован в стальном никелированном сосуде *1* с небольшим кольцевым заплечиком *2*. Стальная никелированная крышка *3* с изоляционной прокладкой *4*, опирающаяся на заплечики, герметически завальцована в стенку корпуса. Внутри корпуса помещены положительный и отрицательный круговые электроды ламельной конструкции, капроновый сепаратор и контактирующая пружина. Выводом положительного электрода служит корпус, отрицательного — крышка. Весь свободный объем аккумулятора заполнен ограниченным количеством электролита КОН.

Несколько иначе сконструирован дисковый аккумулятор, часто называемый «пуговичным», показанный на рис. 9, *в*. Крышка этого аккумулятора сделана не из металла, а из поликапролактама. Вывод от отрицательного электрода находится в центре крышки и имеет вид металлической заклепки. Внешний вид такого аккумулятора похож на пуговицу.

Аккумулятор, показанный на рис. 9, *г*, представляет собой металлический цилиндр *1*, внутри которого помещены два положительных электрода *2*, сепаратор и три отрицательных

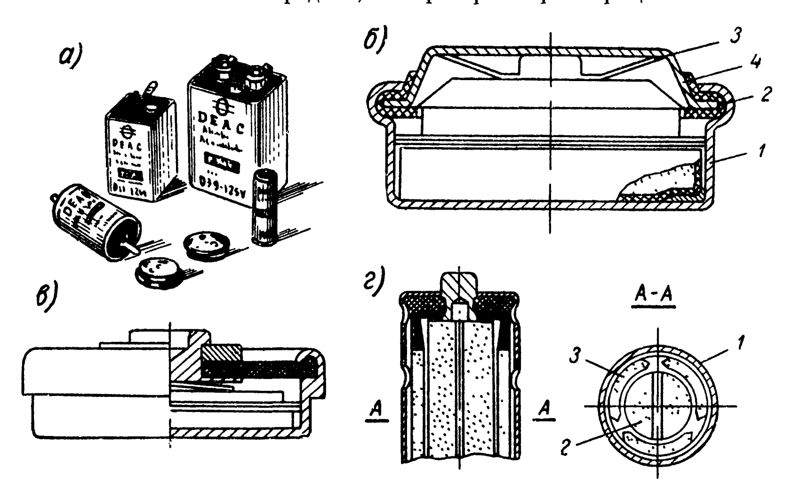


Рис. 9. Малогабаритные герметизированные кадмиево-никелевые аккумуляторы: *а* — внешний вид; *б* и *в* — схематическое устройство дисковых аккумуляторов; *г* — схематическое устройство цилиндрического аккумулятора.

электрода *3*. Крышка и днище цилиндра сделаны из пластмассы, причем в крышку впрессован положительный вывод, а в днище — отрицательный. На корпусе имеются гофры, создающие газовое пространство, которое позволяет избежать чрезмерного повышения давления внутри аккумулятора при его зарядке. Конструкция электродов ламельная, причем положительные электроды выполнены в виде двух полуцилиндров, а отрицательный электрод состоит из трех одинаковых сегментов, наружный диаметр которых сопрягается с кольцевыми впадинами корпуса, а внутренний — с сепаратором.

Что касается прямоугольной конструкции герметизированных аккумуляторов, то они почти ничем не отличаются от описанных по своей основе, и форма электродов не играет существенной роли. Скорее сказывается унификация производства, что не очень существенно при малосерийной технологии.

Существенным достоинством герметизированных кадмиево-никелевых аккумуляторов является то, что процесс их зарядки не нуждается в контроле и регулировании. Аккуму-

ляторы переносят длительные перезарядки и допускают буферный режим работы. Их зарядка рекомендуется малыми токами, но допустим и форсированный режим для сокращения времени зарядки, при этом требуется сообщить до 120—150% номинальной емкости.

При нормальной температуре допустимым током разряда дисковых аккумуляторов является ток, численно равный половине номинальной емкости. При таком режиме разряда аккумулятор отдает 60—90% номинальной емкости. Допускается также разрядка аккумуляторов и в импульсном режиме. При

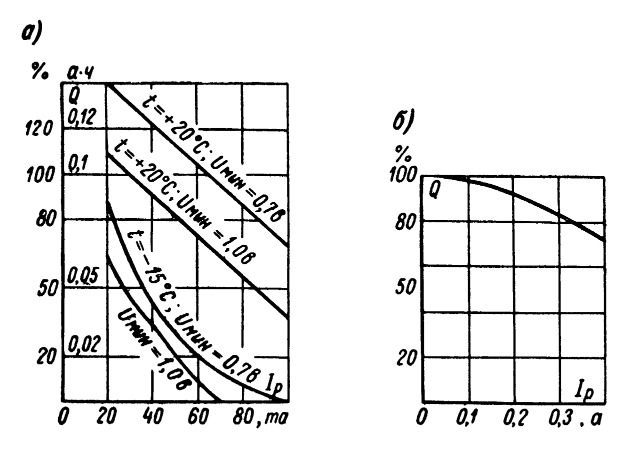


Рис. 10. Зависимость отдаваемой емкости от тока разряда: *а* — для аккумулятора типа Д-0,1; *б* — для аккумулятора типа ЦНК-0,45.

этом разрядное напряжение снижается равномерно со временем разряда и срок службы аккумуляторов не сокращается. Среднее разрядное напряжение аккумулятора составляет 1,22—1,25 *в*, а в импульсном режиме снижается до 1,1 *в*.

Температура среды, в которой эксплуатируются герметизированные аккумуляторы, влияет на их отдачу по емкости: она уменьшается с понижением температуры. Заводские данные предусматривают эксплуатацию аккумуляторов при температурах от +5 до +35° С для дисковых и от —5 до +35° С для цилиндрических. Практически же эти аккумуляторы можно эксплуатировать и при более широких интервалах температур, имея в виду некоторое снижение отдаваемой емкости. Можно практически считать возможным эксплуатацию аккумуляторов при температуре от —15 до +50° С.

Отдаваемая емкость аккумуляторов, как и всех других типов, зависит от величины разрядного тока. В качестве примера такой зависимости на рис. 10, *а* показаны характеристики аккумулятора Д-0,1, а на рис. 10, *б* — характеристики аккумулятора ЦНК-0,45.

Саморазряд дисковых аккумуляторов составляет 0,2—0,3% в сутки, или, как часто указывают в технических условиях, 18% за 30 суток хранения в заряженном состоянии. Последнее определение саморазряда более точное, так как интенсивность саморазряда неодинакова со временем хранения.

Саморазряд, как и высыхание электролита, вследствие несовершенства герметичности аккумуляторов, протекают в различных экземплярах неодинаково интенсивно. При совершенной герметизации высыхание электролита не должно наблюдаться, практически же это имеет место. В радиолюбительской литературе («Радио», 1966) даны советы по доливке электролита, не нарушая нормальной работы аккумуляторов.

Срок службы герметизированных аккумуляторов исчисляется в 100—300 зарядно-разрядных циклов. Этот срок может быть значительно увеличен при правильной эксплуатации аккумуляторов.

Основные данные герметизированных аккумуляторов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Обозначение	Напряжение, *в*		Емкость, *а·ч*	Габариты, *мм*		Вес, *Г*	Токи, *ма*	
	начальное при +20°С	конечное		диаметр	высота		разряда	заряда
Д-0,06*	1,35	1,1	0,06	15,7	6,4	3,6	6,0	6,0
Д-0,07	1,35	1,1	0,07	16,7	6,4	4,8	7,0	7,0
Д-0,1	1,35	1,0	0,1	20,0	6,9	6,56	12,0	12,0
Д-0,12	1,35	1,0	0,12	21,0	7,0	6,81	12,0	12,0
Д-0,2	1,35	1,0	0,20	27,0	10,0	15,5	20,0	20,0
А-5**	1,35	1,0	0,006	7,1	20,0	3,3	70,0	12,0
А-2	1,35	1,0	0,02	7,1	33,0	5,9	200,0	3,0
А-4	1,35	1,0	0,1	7,1	77,0	15,0	200,0	2,0
НФ4***	1,35	1,0	0,22	20,0	33,0	10,6	300,0	5,0
НФ6	1,35	1,0	0,42	24,0	49,0	89,3	600,0	—
ЦНК-0,2	1,35	1,0	0,2	16,0	24,5	15,0	20,0	20,0
ЦНК-0,45	1,35	1,0	0,45	14,0	50,0	23,0	45,0	45,0
ЦНК-0,85	1,35	1,0	0,85	14,0	96,0	96,0	85,0	85,0
6Д-0,07***	—	3,9 + 3,9	0,07	17,5	42,0	35,0	7,0	7,0
7Д-0,1	9,6	7,0	0,1	24,0	62,0	60,0	12,0	7,0
7Д-0,12	—	9,0	0,12	25,0	65,0	66,0	12,0	7,0
2Д-0,2	2,7	2,2	0,2	29,0	22,0	29,0	20,0	20,0
5ЦНК-0,2	6,75	6,6	0,2	18,0	50,0	117,0	25,0	25,0
12ЦНК-0,85	16,0	13,0	0,85	—	—	730,0	110,0	85,0

* Для аккумуляторов Д-0,06—Д-0,2 указаны токи при 10-часовом разряде и 15-часовом заряде

** Для аккумуляторов А-5 — А-4 указаны кратковременные разрядные токи (4—6 *мин.*), а токи заряда — длительностью 10 — 15 *ч.*

*** Для аккумуляторов НФ указаны кратковременные разрядные токи (от 4 до 30 *мин*).

Указанные в табл. 8 батареи типов 6Д-0,07 — 2Д-0,2 составляются из ряда последовательно соединенных элементов. Батареи могут быть составлены из любого количества аккумуляторов с одинаковой емкостью. В противном случае аккумуляторы будут разряжаться по-разному и их отдача по емкости окажется низкой.

Серебряно-цинковые. Серебряно-цинковые аккумуляторы принципиально известны с очень давних пор, но только за последнее десятилетие они получили широкое распространение во всем мире. Для такого широкого распространения и промышленного изготовления этих аккумуляторов потребовалось более полувека. Только в 1943 г. французский ученый Андре создал специальный цинковый электрод, не растворяющийся в щелочном электролите. До этого попытки создания серебряно-цинковых аккумуляторов оканчивались неудачей из-за необратимого растворения цинкового электрода и прорастания дендридов серебра, восстанавливаемого из окиси серебра избытком водорода.

Созданный нерастворимый в электролите цинковый электрод представляет собой окись цинка и цинковой пыли и является отрицательным электродом. При окислении этого электрода поры пластин заполняются гидроокисью и окисью цинка, не растворимыми в малом количестве электролита, которым заполняется аккумулятор. Материалом для положительного электрода служит восстановленная окись серебра. Процесс изготовления электродов очень сложен. Однако трудности изготовления серебряно-цинковых аккумуляторов до последних лет усугублялись спецификой действия сепаратора. С одной стороны, сепаратор должен обладать хорошей проницаемостью для ионного обмена, не должен растворяться в электролите, а его механическая прочность должна быть высокой, чтобы препятствовать проникновению прорастающих дендридов серебра. Таким сепаратором, удовлетворяющим всем основным требованиям, оказалась пленка из гидратцеллюлозы (целлофан). Эта пленка разбухает в электролите, т е. обеспечивает возможности ионного обмена, создавая при этом необходимую плотность сборки пластин электродов и препятствует изменению форм и разрушению электродов, сохраняя свои свойства в диапазоне температур от —50 до +80° С.

Серебряно-цинковые аккумуляторы по своему устройству имеют много общего с безламельными кадмиево-цинковыми аккумуляторами, как об этом можно судить по рис. 11, *а*. В пластмассовом корпусе помещен блок отрицательных и положительных электродов. При сборке положительные пластины обертываются капроновой тканью, стойкой к щелочам, а отрицательные — целлофаном. Этим достигаются описанные выше свойства сепаратора. Блок пластин устанавливается на дно корпуса, и пластины прочно свариваются с надежно удерживающими их выводными зажимами. В результате такого жесткого крепления пластин отпадает надобность в поддерживающих решетках, которыми обычно фиксируют местоположение пластин в аккумуляторах других типов.

Полупрозрачные пластмассовые корпусы аккумуляторов позволяют следить за уровнем электролита в них. На некото-

рых аккумуляторах имеются снаружи две горизонтальные черты, указывающие допустимый уровень электролита при заряде (верхняя черта) и разряде (нижняя черта). Пробки к заливочному отверстию крышки сосуда обычно делаются вентиляционного типа. Они позволяют выводить наружу газы, образующиеся при разряде аккумулятора. В некоторых специальных типах аккумуляторов пробки выполнены так, что аккумулятор может эксплуатироваться в любом положении (горизонтальном, вертикальном), причем в них имеется небольшое количество электролита. Во время зарядки такие аккумуляторы должны находиться в вертикальном положении при отвернутой пробке, поскольку происходит интенсивное выделение газов. Электролитом служит раствор едкого кали (KOH) плотностью 1,4.

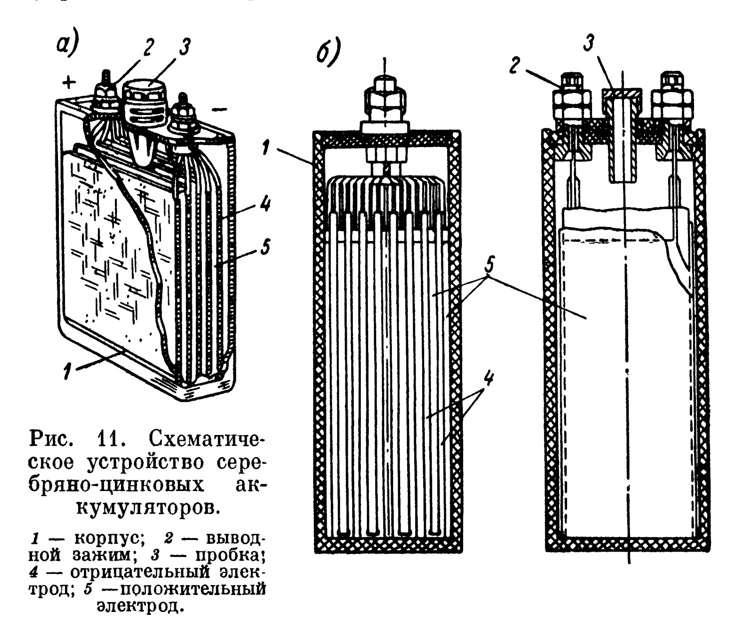


Рис. 11. Схематическое устройство серебряно-цинковых аккумуляторов.

1 — корпус; *2* — выводной зажим; *3* — пробка; *4* — отрицательный электрод; *5* — положительный электрод.

На рис. 11, *б* показано схематическое устройство СЦ-аккумулятора несколько другой конструкции, сохраняющего в основном все описанные выше особенности.

Электрохимические процессы в серебряно-цинковом аккумуляторе протекают несколько по-разному, в зависимости от режима работы: разряда большим током в короткое время (стартерный режим) или малым током длительное время. В первом режиме разряда цинк не успевает раствориться в электролите KOH и образовать калиевую соль цинковой кислоты — цинкат калия K_2ZnO_2. При длительном режиме разряда химические процессы осложняются образованием цинката калия, когда идет растворение цинка в электролите, окислением

цинка в гидрат окиси $Zn(OH)_2$ и восстановлением окиси двухвалентного серебра AgO в окись одновалентного серебра Ag_2O. Одновременно с дальнейшим окислением цинка происходит восстановление Ag_2O в металлическое серебро. Первая часть процессов осуществляется при разряде и уменьшении напряжения от 1,88 до 1,5 *в*, а дальнейшая реакция происходит при напряжении около 1,5 *в*. Как можно показать химическими уравнениями, разряд СЦ-аккумуляторов сопровождается убылью воды в электролите и выделением ее при заряде.

Зарядка аккумуляторов производится при напряжении 2,1 *в*. Наибольшая отдача по емкости достигается при длительной зарядке (10—20 *ч*). Допускается также и быстрая зарядка, например за 15 *мин*, но при этом снижается емкость до 80% номинальной.

Существенным преимуществом СЦ-аккумуляторов перед другими являются большая допустимая плотность тока (до 0,5 $а/см^2$ активной поверхности пластин) и малое внутреннее сопротивление. Это дает возможность эффективно использовать эти аккумуляторы при импульсной нагрузке.

Основные данные СЦ-аккумуляторов приведены в табл. 9.

Нормальными рабочими температурами СЦ-аккумуляторов при нормальном атмосферном давлении (760 *мм рт. ст.*) считаются —30 и +70° С, но они достаточно хорошо работают и при температуре до —59° С, весьма близкой к температуре замерзания электролита. Верхним пределом рабочей температуры этих аккумуляторов можно считать +80° С. Важным свойством СЦ-аккумуляторов является их стойкость к относительно большим перепадам давления окружающей среды.

Саморазряд СЦ-аккумуляторов за 30 суток хранения в заряженном состоянии достигает 20%. Хранение при температуре свыше +40° С приводит к потере емкости. При температуре —30° С эти аккумуляторы отдают в нагрузку до 50% емкости, а при —40° С только около 20%.

Параллельная работа аккумуляторов недопустима. Также недопустима неодинаковая разрядка отдельных аккумуляторов батареи, ибо могут возникнуть условия, при которых один аккумулятор будет заряжать другой аккумулятор этой же батареи. Поэтому при последовательном соединении аккумуляторов их надо подбирать с одинаковой номинальной емкостью.

Серебряно-кадмиевые. Серебряно-кадмиевые аккумуляторы, разработанные за последние годы, производятся в виде маломощных герметизированных источников тока дисковой конструкции. В них сочетаются положительные свойства СЦ-аккумуляторов и возможности герметизации. Эти положительные свойства достигаются за счет использования дорогостоящего кадмия вместо цинка. Как известно, кадмий значительно дороже серебра.

Внешний вид герметизированных серебряно-кадмиевых аккумуляторов показан на рис. 12, *а*. В этих аккумуляторах положительным электродом служит одновалентная окись серебра, отрицательный электрод изготовлен из металлического кадмия. Конструкция аккумулятора почти такая же, как у серебряно-цинковых, т. е. электроды представляют собой прессованную активную массу, нет тяжелого каркаса-

Таблица 9

Обозначение	Емкость при 10-часовом разряде *а·ч*	Удельная емкость, *а·ч/кГ*	Напряжение, *в*	Габариты, *мм*	Вес, *Г*	Ток, *а*	
						заряда	разряда
СЦ-0,5	0,85	65	1,5	24·12·47	24	0,03	2
СЦ-1,5	1,8	65	1,5	48·14·50	35	0,08	3,5
СЦ-3	4,5	80	1,5	43·18·73	95	0,15	35
СЦ-5	7,5	70	1,5	45·32·77	160	0,5	60
СЦ-11	11	60	1,5	21·41·100	190	1,0	120
СЦ-12	14	95	1,5	48·22·115	195	1,0	80
СЦ-15	16,5	95	1,5	48·28·115	245	1,0	100
СЦ-18	20	100	1,5	48·33·115	300	1,5	120
СЦ-25	25	100	1,5	48·48·136	330	1,5	150
СЦ-40	45	60	1,5	53·50·160	720	4,0	180
СЦ-45	50	60	1,5	53·50·165	760	4,0	200
СЦ-50	55	60	1,5	64·49·165	840	5,0	250
СЦ-70	80	60	1,5	91·50·166	1 350	7,0	400
СЦ-95	95	50	1,5	71·55·212	1 820	10	1200
СЦ-100	100	60	1,5	106·50·153	1 600	10	600
СЦ-120	130	70	1,5	71·55·237	1 900	12	650
ЭСЦ-5	7,5	70	4,5	96·45·77	590	0,5	4,5
5СЦ-5	7,5	60	7,5	160·45·77	1 020	0,5	7,5
8СЦ-45	50	60	12	200·110·160	6 480	4,5	200
15СЦ-45	45	60	22,5	432·126·170	16 000	4,5	200

Примечания: 1. Зарядный ток указан для 10-часового режима, а ток разряда — для 5-минутного режима.

2. Вес аккумуляторов указан с электролитом.

3. В обозначениях иногда указывается третья буква: *С* — зарядка средней длительности; *К* — короткая зарядка.

токоотвода, использована пленочная сепарация и плотная сборка электродного пакета. В качестве электролита применяется концентрированный раствор едкого кали (40% КОН).

Растворимость окиси кадмия в электролите мала, и образование дендридов кадмия почти не имеет места. Вследствие этого короткие замыкания через сепаратор и разрушение сепаратора по этим причинам почти исключены и срок службы серебряно-кадмиевых аккумуляторов должен бы быть выше, чем СЦ-аккумуляторов Однако из-за недостаточной химической стойкости сепаратора сроки службы у этих аккумуляторов соизмеримы. По различным литературным данным указывается срок службы серебряно-кадмиевых аккумуляторов от 1000 до 3000 зарядно-разрядных циклов. Отмечается хорошая сохранность аккумуляторов как в сухом, так и в залитом состоянии.

На рис. 12, *б* приведены зарядно-разрядные характеристики серебряно-кадмиевого аккумулятора, а на рис. 12, *в* — характе-

ристики зависимости разрядного напряжения от температуры окружающей среды. Из этих характеристик следует, что среднее рабочее напряжение составляет 1,15—1,05 *в*, рабочая температура практически составляет от —30 до +30° С; удельная энергия до 70 *вт·ч/кГ* или до 130 *вт·ч/л*.

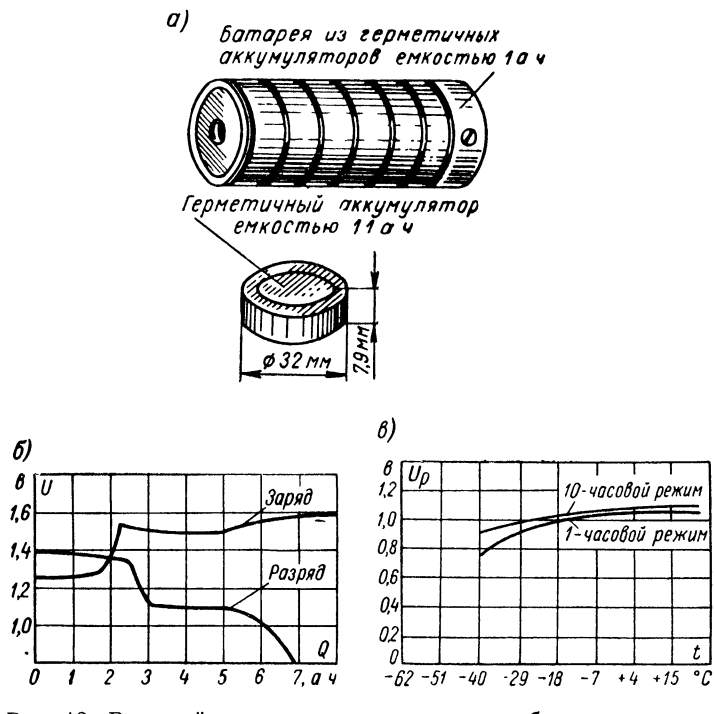


Рис. 12. Внешний вид герметизированных серебряно-кадмиевых аккумуляторов (*а*), их зарядно-разрядные характеристики (*б*) и зависимость разрядного напряжения от температуры окружающей среды (*в*).

В последние годы в литературе появились также сообщения об использовании негерметизированных серебряно-кадмиевых аккумуляторов большой мощности (до 300 *а·ч*).

Никель-цинковые. Первые попытки осуществления НЦ-аккумуляторов относятся почти к столетней давности (1867 г.). Все неудачные попытки были связаны с неравномерным осаждением цинка при заряде. Практически никель-цинковые аккумуляторы были освоены промышленностью сравнительно недавно.

По своей конструкции НЦ-аккумуляторы со спеченными окисно-никелевыми и порошковыми цинковыми электродами подобны безламельным, в частности серебряно-

цинковым, аккумуляторам. Положительным электродом служит высокопористая металлокерамическая (никелевая) основа, пропитанная активным веществом — гидратом закиси никеля. Никелевую пластину изготовляют, спекая при высокой температуре порошок карбонильного никеля. Положительный электрод обернут капроновой тканью. Отрицательный электрод

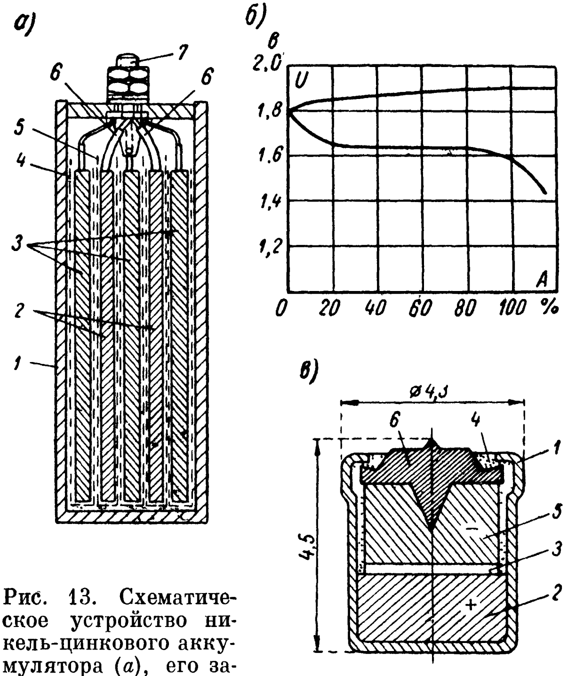


Рис. 13. Схематическое устройство никель-цинкового аккумулятора (*а*), его зарядно-разрядные характеристики (*б*) и устройство миниатюрных аккумуляторов (*в*).

1 — полистироловый сосуд; 2 — отрицательный электрод; 3 — положительный электрод; 4 — капроновый чехол; 5 — целлофановая оболочка; 6 — изоляционная трубка отрицательного токоотвода; 7 — борн.

в виде брикета, спрессованного из смеси просеянной окиси цинка и связующего раствора, обернут несколькими слоями специально обработанного целлофана. Электролитом служит раствор едкого кали с добавкой гидрата окиси лития. Общий вид (схематическое устройство) НЦ-аккумулятора показан на рис. 13, *а*. Зарядно-разрядные характеристики аккумулятора приведены на рис. 13, *б*. При шестичасовом режиме зарядки напряжение не должно превышать 2,05—2,1 *в*. В случае необходимости зарядка может быть выполнена за 1 *ч*.

НЦ-аккумуляторы работоспособны при температурах —30 ÷ +40° С. При —30° С и трехчасовом режиме разрядки до

напряжения 1,3 *в* аккумуляторы отдают до 22% емкости, а при разрядке до 1,0 *в* — до 34% номинальной емкости. При месячном хранении в условиях комнатной температуры (+17° С) саморазрядка НЦ-аккумуляторов составляет 20—30% номинальной емкости. Срок службы — до 100 зарядно-разрядных циклов.

Специальные типы аккумуляторов. К специальным типам аккумуляторов могут быть отнесены описанные в литературе и не нашедшие массового распространения или промышленного изготовления. К таким аккумуляторам могут быть отнесены:

1) газовые аккумуляторы, в которых при зарядке накапливаются запасы газов, расходуемые в процессе электрической разрядки;

2) щелочные медно-цинковые;

3) щелочные медно-никелевые;

4) медно-свинцовые;

5) различные аккумуляторы специального назначения, к которым относятся описываемые ниже.

Герметизированные никель-кадмиевые аккумуляторы с управляющими электродами с одночасовым зарядом. При превышении в процессе зарядки допустимой величины заряда аккумулятора в нем образуется кислород, взаимодействующий с материалом управляющего электрода. В результате этого в цепи управляющего электрода меняется ток и срабатывает реле, размыкающее зарядную цепь. Указывается также возможность использования реле в цепи зарядки, реагирующее на изменение напряжения на аккумуляторе; управляющий электрод может быть использован для автоматизации процесса зарядки различных щелочных аккумуляторов, причем:

а) поглощение поверхностью управляющего электрода кислорода, выделяющегося при интенсивной и чрезмерной зарядке, исключает возникновение повышенного давления газов внутри аккумулятора, облегчается герметизация и упрощается конструкция кожуха, обеспечивая уменьшение необходимого веса и габариты;

б) стоимость малогабаритных герметизированных аккумуляторов с управляющим электродом превышает на 20—30% стоимость обычных аккумуляторов, что окупается свойственными им достоинствами.

Серебряно-цинковые аккумуляторы с повышенной рабочей температурой (до +125° С в течение 2,5 месяца действия). Такой режим обеспечивается применением неорганической теплостойкой перегородки между электродами, а также видоизменением конструкции электродов, исключающим их деформацию при нагревании. Опытные аккумуляторные батареи при испытании выдерживали до 1750 зарядно-разрядных циклов: 10 недель работы при температуре +110° С и одну неделю при температуре +150° С.

Щелочные аккумуляторы для питания портативных телевизоров. В них электроды сделаны из цинка и двуокиси марганца, электролитом служит гидроокись калия. Номинальное напряжение каждого аккумулятора 1,5 *в*. Соединение аккумуляторов в батареи осуществлено при помощи штепсельных

Таблица 10

Тип аккумулятора и режим его работы	Удельная энергия		Рабочее напряжение, *в*	Рабочие температуры, °C	Число рабочих циклов
	вт × × *ч/кГ*	*вт·ч/л*			
Свинцовые в стартерном разряде	30	56	2,0	—18 ÷ +30	500
Свинцовые в длительном режиме разряда	35	60	2,0	—20 ÷ +45	1000
Кадмиево-никелевые ламельные	18	25	1,25	—20 ÷ +40	200
Кадмиево-никелевые безламельные	40	65	1,25	—20 ÷ +40	200
Кадмиево-никелевые герметизированные, дисковые	20	70	1.25	+5 ÷ +30	300
Кадмиево-никелевые герметизированные, цилиндрические	24	70	1,25	+5 ÷ +30	300
Серебряно-цинковые в стартерном режиме	100	200	1,45	—40 ÷ +70	80
Серебряно-цинковые в режиме длительного разряда	130	260	1,5	—40 ÷ +70	100
Серебряно-кадмиевые герметизированные	70	130	1,15	—30 ÷ +30	300
Никель-цинковые	65	110	1,65	—30 ÷ +40	100

Примечания: 1. Приведенные в таблице данные являются усредненными для ряда аккумуляторов

2. Допустимое число зарядно-разрядных циклов соответствует нормальным условиям эксплуатации

разъемов. Аккумуляторы как модификация гальванических элементов сохранили их свойства: герметизированы и хранятся в заряженном состоянии.

Щелочные марганцевые аккумуляторные батареи характеризуются малым внутренним сопротивлением и способны работать при больших токах разряда, при температурах от —40 до +50° С; зарядка выполняется в течение 10—12 *ч*, допуская до 60 зарядно-разрядных циклов.

В начале разрядки аккумуляторы обладают резервом мощности (до 200%), рабочее напряжение 1,0—1,3 *в*. Если аккумулятор разряжается до более низкого напряжения (до 0,9 *в*), то срок службы сокращается. В ущерб сроку службы можно аккумуляторные батареи разряжать до более низких напряжений.

Миниатюрные аккумуляторы производятся в ФРГ с номинальной емкостью 4,5 *ма · ч*, с разрядным напряжением 1,25 *в* и удельной емкостью 70 *ма · ч/см*^{3}. Высота аккумулятора 4,5 *мм* при диаметре 4,3 *мм*. Устройство такого аккумулятора

видно из рис. 13, *в*, где *1* — стальной стаканчик; *2* — положительный электрод из гидроокиси никеля и графита; *3* — сепараторная пластина; *4* — изолирующая пластмассовая шайба; *5* — отрицательный электрод из тонкоразмолотого кадмия; *6* — вывод отрицательного электрода.

Сравнительные характеристики аккумуляторов

Для выбора и сравнения параметров аккумуляторов различного типа можно воспользоваться табл. 10, в которой приведены обобщенные характеристики.

Помимо приведенных в табл. 10 обобщенных характеристик аккумуляторов, надо учитывать их отдачу по емкости, саморазряд, срок хранения, механическую прочность и вибростойкость и ряд других эксплуатационных свойств.

3. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Топливные элементы, название которых до последнего времени считалось условным, обеспечивают непосредственное преобразование энергии химических реакций в электрическую энергию. Их действие основано на электрохимическом окислении вещества-топлива, т. е. аналогично реакции горения в тепловых машинах. Однако в отличие от тепловой машины в этих элементах окисление топлива и восстановление кислорода происходят на разных электродах, отсутствует выделение больших количеств тепла, и энергия реакций выделяется в виде электрической энергии в нагрузке без промежуточных преобразований, обеспечивая высокий к. п. д. использования топлива.

Как известно, в обычных электрохимических источниках тока происходят окислительно-восстановительные процессы, в ходе которых активные вещества расходуются, и спустя определенное время такие элементы становятся непригодными для дальнейшего использования. В топливном же элементе, также являющемся электрохимическим источником тока, электроды в процессе работы элемента не разрушаются и в реакциях активно не участвуют. В топливных элементах химические реакции протекают при взаимодействии активных веществ, которые в газообразном и жидком виде непрерывно подводятся к электродам. Пока идет подача активных веществ, происходит их взаимодействие и выделяется в нагрузке электрическая энергия.

История развития топливных элементов насчитывает более 100 лет. Однако только за последние два десятилетия их развитие достигло такого уровня, что их начинают применять в промышленности, в особенности для электропитания радиоустройств космических кораблей. Современные топливные элементы не являются совершенными. Над улучшением их качеств работают многие ученые всего мира.

Топливные элементы делят на три основные группы: с газовым топливом, с твердым или жидким

топливом и с «редокс-системой». Возможно также подразделение элементов по рабочим температуре и давлению. Элементы с рабочей температурой до 250° С считаются низкотемпературными, от 250 до 1000° С — высокотемпературными. По рабочим давлениям газа различают элементы с низким (до 5 *атм*) и с высоким (от до 60 *атм*) давлением. Как низкотемпературные, так и высокотемпературные элементы могут быть низкого и высокого давлений. Как правило, для элементов с жидким или твердым топливом требуется более высокая температура, чем для элементов с газовым топливом.

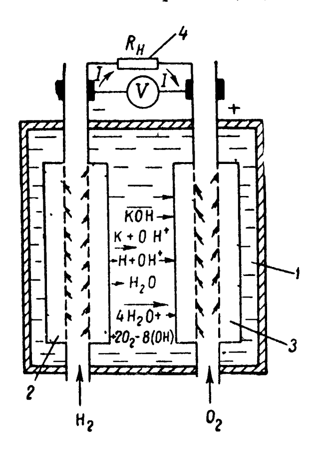


Рис. 14. Схематическое устройство топливного элемента.

1 — электролит КОН; *2* — водородный отрицательный электрод; *3* — кислородный положительный электрод; *4* — нагрузка.

Наиболее простыми и достаточно хорошо освоенными являются водородно-кислородные топливные элементы. Схематическое устройство простейшего топливного водородно-кислородного элемента показано на рис. 14. При протекании водорода и кислорода через пористые трубки, находящиеся в щелочном электролите КОН, происходит разложение водорода H_2 на положительные ионы и электроны. Ионы водорода вступают в соединение с ионами гидроксила электролита и образуют воду H_2O в соответствии с уравнением:

$$H + HO^- \rightarrow H_2O$$

Отрицательные заряды (электроны), собирающиеся на трубке *2*, являющейся отрицательным электродом элемента, движутся по внешней цепи через сопротивление нагрузки к электроду (трубке) *3*, где они захватываются кислородом. В результате по сопротивлению нагрузки протекает электрический ток.

Кислород, протекающий в пористой трубке *3*, вступает тоже в реакцию с водой электролита, образуя гидроксильный остаток ОН. В результате кислород непрерывно пополняет в электролите расход гидроксила ОН, а водород поддерживает необходимое количество воды в электролите. Таким образом, описываемый процесс в топливном элементе противоположен процессу электролитического разложения воды, когда при пропускании тока через подкисленную воду образуется кислород и водород.

Описанный водородно-кислородный топливный элемент относится к низкотемпературным элементам, конструкции которых в разных странах мира имеют много сходного. Одним из широко известных топливных водородно-кислородных элементов высокого давления является элемент Бэкона (США,

1952), упрощенное схематическое устройство которого показано на рис. 15, *а*. В нем через отверстие *1* в кожух *2* нагнетается водород под давлением до 56 *кГ/см²*, а через отверстие *3* нагнетается кислород. Обратная циркуляция избыточного водорода осуществляется через отверстие *4*. Электрод *5*, изготовленный из порошка никелевой окалины с крупными порами (размером до 30 *мк*), находится под воздействием

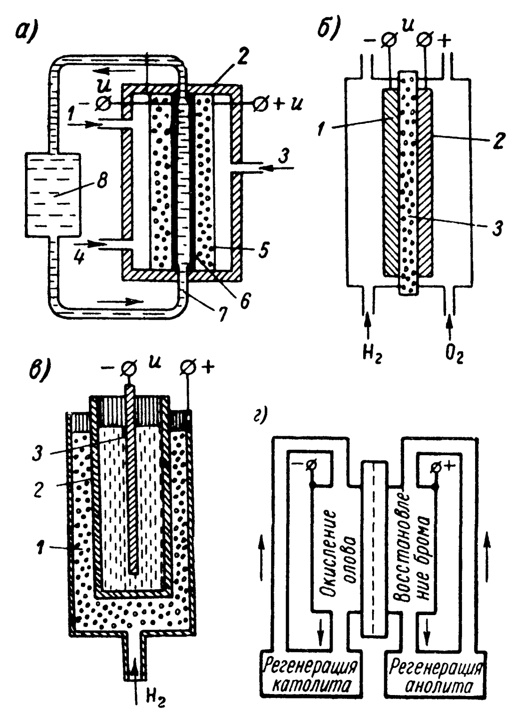


Рис. 15. Схематическое устройство топливных элементов: *а* — Бэкона; *б* — Давтяна; *в* — Юсти; *г* — «редокс-системы».

газа; от него сделан вывод «+», к которому подключают нагрузку. Электрод *6*, изготовленный тоже из порошка никелевой окалины, но с мелкими порами (размером до 16 *мк*), омывается электролитом, и от него сделан вывод «—». В качестве электролита *7* использовано 27%-ное едкое кали. Небольшая разность давления газа и электролита препятствует диффузии электролита в поры «газовой» поверхности электродов. Поляризация электродов уменьшается благодаря циркуляции электролита с помощью термосифона *8*.

Широкую известность получили топливные элементы Давтяна (СССР, 1947). Схематическое устройство одного из эле-

ментов Давтяна показано на рис. 15, *б*. Электрод *1* состоит из смеси $Fe_2O_3 + Fe$; электрод *2* — из смеси $Fe_2O_3 + Fe_3O_4$; электролитом *3* служит огнеупорная смесь, содержащая Na_2CO_3 и обладающая при высокой температуре достаточной ионной проводимостью. Электроды и электролит заключены в герметизированный кожух, через который продувают водород при атмосферном давлении и температуре 550—900° С. При температуре водорода 700° С плотность тока в элементе достигает 20 *ма/см*² при рабочем напряжении 0,8 *в*. Недостатками этого элемента являются низкая плотность тока и хрупкость электродов.

В других элементах Давтяна, работающих при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении водорода, достигнута плотность тока 35 *ма/см*² при рабочем напряжении 0,75 *в* (жидкий электролит). Усовершенствование элементов Давтяна заключается во введении диафрагм, предохраняющих угольные электроды от смачивания их электролитом. Такие диафрагмы сравнительно быстро разрушаются под действием электролита, вызывая увеличение внутреннего сопротивления элемента, что при больших токах нагрузки приводит к снижению рабочего напряжения.

Типичными элементами с твердым топливом являются элемент Юсти и сходные с ним элементы Бишофа, Шпенглера и других, относящиеся к разработкам 1956—1960 гг. Схематическое устройство элемента Юсти показано на рис. 15, *в*. Здесь H_2 циркулирует по пространству *1*, заполненному измельченными окислами металла с переменной валентностью Fe_3O_4 или смесью $Cu_2O + CuO$. За цилиндрической перегородкой *2*, сделанной из керамики и пропитанной карбонатами щелочных металлов, находится отрицательный электрод *3*, выполненный из спрессованного графита. Рабочая температура элемента составляет 700—800° С. Э. д. с. элемента в сильной мере зависит от скорости циркуляции H_2, чистоты графита и размеров его частиц.

В упрощенном виде действие такого элемента сводится к тому, что ионы кислорода, поглощаясь электролитом, образуют с ионами натрия окись натрия. При этом катод получает положительный заряд, так как теряются отрицательные заряды кислорода. Положительные ионы углерода, соединяясь с ионами кислотного остатка CO_3, образуют двуокись углерода CO_2, и анод получает отрицательный заряд. Возникающая при этом разность потенциалов между электродами составляет 1,02—1,04 *в*, а рабочее напряжение ниже 0,8 *в*.

Создание топливных элементов с твердым топливом, подобных элементу Юсти, привлекает внимание ученых всего мира, но при этом должны быть разрешены многие затруднения, в том числе и такие, как коррозия металлов при высокой температуре, необходимость применения химически чистого угля, устранение поляризации электродов, необходимость затраты большого количества энергии на поддержание высокой температуры и др.

Топливные элементы, относящиеся к группе «редокс-систем», представляются специалистам более перспективными, чем описанные, благодаря разделению в них химических и токообразующих процессов, что позволяет более широко варьи-

ровать в выборе топлива и окислителей. В таких элементах реакции не связаны с химическим изменением вещества, а только вызывают изменение валентности инертных электродов, например олова или брома. Схематическое устройство такого элемента показано на рис. 15, *г*. Здесь в отрицательном электроде элемента происходит реакция восстановления четырехвалентного олова в двухвалентное, причем электрод приобретает два электрона и заряжается отрицательно. На положительном электроде происходит реакция окисления брома в двухвалентный бром кислородом воздуха, в результате чего электрод приобретает положительный заряд. Очевидно, что олово и бром в этом «редокс-элементе» являются электролитами. Часто олово, которым пропитан отрицательный угольный пористый электрод, называется католитом, а бром — анолитом. Возможны и другие вещества католитов и анолитов.

Оба электрода элемента разделены ионообменной мембраной, не допускающей смешивания одного электролита с другим, но не препятствующей обмену ионами.

Процесс токообразования в этом элементе сводится к восстановлению высоковалентного вещества анолита и окислению католита. Для непрерывной работы элемента требуется регенерация этих веществ, что осуществляется за счет расходования горючего (уголь или углеводороды) и окислителя (кислород воздуха) в дополнительных резервуарах, показанных на рис. 15, *г*.

Описанный элемент работает при комнатной температуре с выделением избыточного тепла, возникающего за счет химических реакций. Э. д. с. элемента описанного типа около 1,2 *в*, удельная энергия достигает 150 *вт · ч/кГ*.

О современном распространении топливных элементов с целью их использования в качестве источников тока можно судить хотя бы по некоторым отдельным примерам современных разработок, в том числе следующих.

Для космического корабля «Аполлон» разработана батарея топливных элементов для питания бортовой сети с выходным напряжением 27—31 *в* при мощности 1420 *вт*, весящая около 100 *кг*. Батарея состоит из 31 элемента Бэкона

Для космических кораблей «Джеминай» разработаны водородно-кислородные топливные элементы с модульной конструкцией. Каждый модуль состоит из 32 последовательно соединенных элементов; три модуля соединены параллельно. Каждая батарея обеспечивает напряжение 26,5—23,3 *в* и мощность 1000 *вт*; габариты батареи: диаметр 500 и высота 600 *мм*, общий вес 32 *кГ*. На корабле имеются две батареи.

Рекламируется новый топливный элемент на дизельном топливе, в котором окислителем служит воздух. В этом элементе можно также использовать бензин и пропан. Разработка такого элемента связана с желанием заменить дорогостоящий водород. Указывается на возможность использования подобных элементов для питания электродвигателей, в том числе используемых для замены двигателей внутреннего сгорания в автомобилях с целью коренной реконструкции автотранспорта и повышения к. п. д., улучшения управляемости, устранения выхлопных газов и т. д. Естественно, что эти топливные

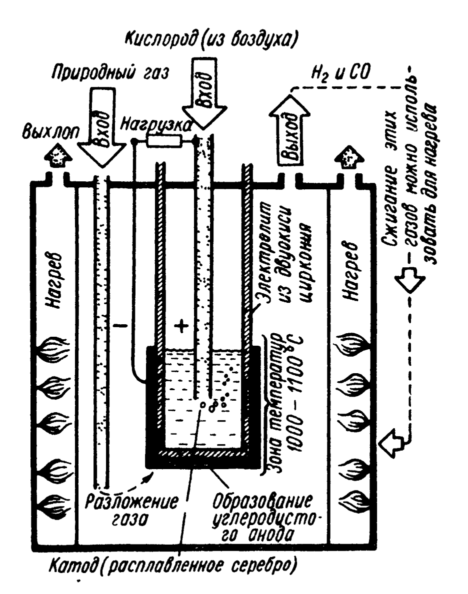


Рис. 16. Схематическое устройство топливного элемента на природном газе.

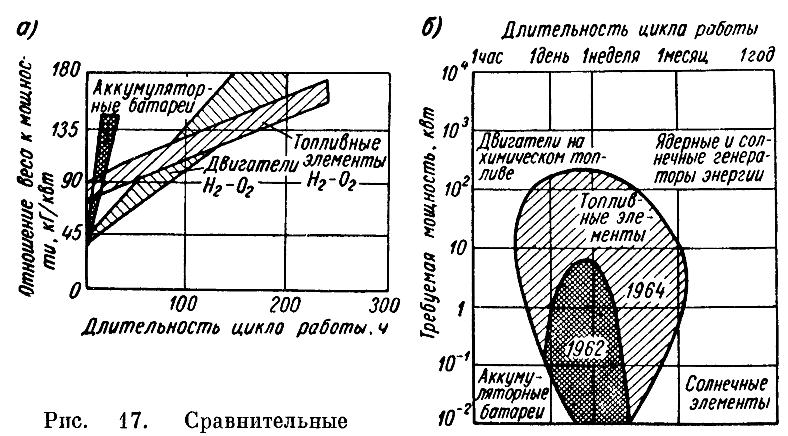


Рис. 17. Сравнительные характеристики аккумуляторов, газовых двигателей и топливных элементов: *а* — по удельной мощности; *б* — по мощности.

элементы предназначены и для электропитания портативных радиоустройств.

Широко рекламируется топливный элемент на природном газе или на любом другом дешевом углеводородном топливе, схематическое устройство которого показано на рис. 16. Здесь топливный газ поступает через верхний патрубок и в зоне нагрева до 1000—1100° С разлагается, образуя водород и углерод, причем образующийся водород частично используется для нагрева элемента. Углерод осаждается на внешних стенках тигеля, выполненного из огнеупорной двуокиси циркония, являющегося твердым электролитом. Этот тигель служит вместе с тем и отрицательным электродом (анодом). Катодом элемента служит расплавленное серебро, в котором постоянно растворяется кислород, поступающий из воздуха.

Ионы кислорода, несущие по два электрона каждый, из расплавленного серебра движутся к аноду и взаимодействуют с углеродом, образуют окись углерода CO, высвобождая при этом электроны и создавая разность потенциалов между катодом и анодом.

Помимо описанных отдельных типов топливных элементов, существует еще огромное число разнообразных конструкций, подобных описанным. Из рис. 17, *а* видно, что по длительности цикла работы топливные элементы имеют преимущество перед аккумуляторами и газовыми двигателями с электрическими машинными генераторами. Из рис. 17, *б* видно, что топливные элементы все больше и больше вытесняют ряд других источников тока, обеспечивая большие мощности и длительности циклов работы. Только при очень большой длительности цикла и малой мощности топливные элементы уступают солнечным элементам и ядерным источникам электроэнергии.

Существенно важными достоинствами топливных элементов, делающих их часто незаменимыми источниками электрической энергии, являются бесшумность действия, сравнительно высокая экономичность, отсутствие вибраций, нечувствительность к изменениям температуры окружающей среды, а также перспективность дальнейшего совершенствования.

4. БИОХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Биохимические источники тока (элементы) можно отнести к топливным, поскольку в них протекают почти такие же окислительно-восстановительные процессы, как и описанные выше в аккумуляторах. Различие этих элементов между собой заключается в способе получения активного топлива и окислителя. Часто оба или один из активных веществ, необходимые для нормальной работы элемента, получаются с помощью бактерий или ферментов из различных углеводородов; углеводов; кислот жирного ряда; мочевины; веществ, содержащихся в морской воде; растительных и животных отбросов и многих материалов, которые обычно нельзя использовать даже в обычных тепловых энергетических установках.

Различают два основных вида биохимических элементов: к о с в е н н о г о и н е п о с р е д с т в е н н о г о действия.

В элементах косвенного действия бактерии используются для превращения органического топлива в водород и кислород, а в элементах непосредственного действия бактерии принимают участие в токообразующем процессе.

Есть основания полагать элементы непосредственного действия наиболее перспективными, поскольку при этом способе не происходит расходование органических веществ и не требуется непрерывного их пополнения. Одно из возможных устройств биохимического элемента непосредственного действия схематически показано на рис 18 Здесь в сосуд элемента *1* со слабым раствором серной кислоты с некоторым количеством сернокислого железа (электролит *7*) опущен пассивный электрод *2* из платины или графита. В этом же сосуде расположен другой сосуд *6* из пористого материала, в котором также имеется пассивный электрод *5*. Сосуд *6* заполнен водным раствором *8*, содержащим особый вид бактерий. В этот раствор подается воздух или кислород через патрубок *3*.

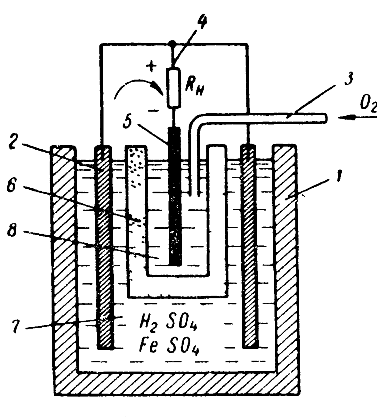


Рис. 18. Схематическое устройство биохимического элемента непосредственного действия.

При взаимодействии раствора серной кислоты с сернокислым железом происходит превращение двухвалентного железа в трехвалентное, причем этот процесс сопровождается выделением одного валентного электрона. Освободившийся электрон через пассивный электрод *2*, являющийся коллектором электронов, и внешнюю цепь *4* (нагрузку) направляется к электроду *5*, находящемуся в биологическом растворе, бактерии которого обладают способностью поглощать электроны с образованием молекулы воды за счет присоединения кислорода, поступающего в раствор. В результате по сопротивлению нагрузки протекает ток, величина которого зависит от поглощающей способности бактерий

В современной зарубежной литературе имеются многочисленные сообщения о различных типах биохимических топливных элементов, в том числе с бактериями, питающимися сульфатами, с организмами, выделяющими аммиак, и с метановыми организмами, а также с преобразованием травы, листвы и другой растительности в водород. Сообщается об окончании разработки в США биохимического элемента с длительным сроком службы, в котором используются бактерии. Элемент состоит из 12 пластмассовых контейнеров величиной с обычный аптекарский флакон, наполненный водным раствором смеси дрожжевых грибков или грибков плесени хлеба с размельченным в порошок рисом. Возникающий в этой смеси

процесс брожения сопровождается выделением электрической энергии. Анодом и катодом образуемого таким образом биохимического элемента являются соответственно медная и алюминиевая пластинки. Срок действия такого элемента весьма велик.

Американская фирма «Мельпар» разработала топливный элемент с водородно-кислородным обменом, в котором используются бананы, что дало им основание рекламировать «банановое электричество». Бродильная смесь водородного генератора этого элемента состоит из микроорганизмов, раствора неорганических солей и бананов. Полагают, что бананы можно заменить тыквой, виноградом и практически любыми другими плодами или ягодами. Этот элемент вырабатывает энергию мощностью 3,5 *вт* в течение 24 *ч*.

Очевидно, что биохимические элементы не являются еще промышленными источниками тока. Тем не менее им уделяется огромное внимание и их считают весьма перспективными. В связи с разработкой биохимических элементов ведутся интенсивные исследования по генерированию электричества живыми организмами. Например, опубликованы материалы исследования генерирования электричества в теле крысы. Для этих целей исследуемой крысе вводились два электрода: под кожу и в брюшную полость. В нагрузке 500 *ом*, подключенной к электродам, развилось напряжение 0,23 *в*, мощность в нагрузке составляла 155 *мквт* Наблюдения за крысой велись в течение шести месяцев. В качестве нагрузки служит транзисторный генератор на 500 *кгц*, непрерывно работавший по 8 *ч*.

Как известно, генерирование электрической энергии, часто с очень высоким напряжением при импульсных разрядах, наблюдалось давно у таких рыб, как электрический скат и некоторых других. Наблюдались явления свечения многих организмов в морях и океанах, что дает основание полагать о наличии более интенсивных «источников тока», чем крыса. Насколько вероятна практическая целесообразность использования живых организмов для генерирования электрической энергии, пока сказать трудно, но в литературе отмечается актуальность этих исследований с точки зрения возможного использования микроэлектронных датчиков, питаемых таким током, для стимулирования некоторых функций животного или человека.

5. ТЕРМОЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Термоэлектронные (плазменные) генераторы преобразовывают тепловую энергию в электрическую за счет использования термоэлектронной эмиссии нагретых тел. Как известно, термоэлектронная эмиссия используется широко в самых разнообразных электронных приборах, и, казалось бы, нет основания считать эти приборы источниками тока. Наоборот, для того чтобы электронная лампа или другой электронный прибор действовал, требуется напряжение постоянного тока для создания

ускоряющего поля, благодаря которому эмиттированные катодом электроны движутся к аноду. В термоэлектронном генераторе процессы протекают несколько иначе.

На рис. 19 приведены простейшие схемы включения термоэлектронного генератора и электронной лампы. В обоих случаях термоэлектронная эмиссия определяется температурой катода, как об этом можно судить на основании известного уравнения удельного тока эмиссии:

$$I_{eq} = AT^2e^{-\frac{b_0}{T}},$$

где A — коэффициент, зависящий от материала катода; $b_0 = e\varphi_0/k$ — коэффициент пропорциональности работы выхода электронов; T — абсолютная температура катода.

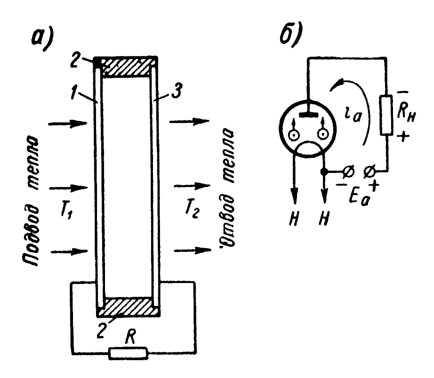


Рис. 19. Простейшие схемы включения термоэлектронного генератора (*а*) и электронной лампы (*б*).

1 — катод; *2* — баллон; *3* — анод.

Таким образом, тепло, подводимое к катоду термоэлектронного генератора, обеспечит нагрев катода до температуры T_1 и создаст эмиссию электронов с его поверхности. Чтобы уменьшить работу выхода и увеличить эмиссионную способность такого катода, его поверхность активируют, покрывая пленкой щелочноземельных металлов (бария, цезия и др.). Этим достигается также снижение необходимой температуры T_1.

Как в электронной лампе, так и в генераторе эмиттированные катодом электроны движутся к аноду. В электронной лампе такое движение обусловлено наличием ускоряющего поля. В генераторе же движение электронов к аноду может быть только в первый момент времени, а затем их движение должно прекратиться, если анод не охлаждать. Это следует из того, что эмиттированные электроны обладают кинетической энергией, пропорциональной T_1, т. е. $mv^2/2 = {}^3/_2\ \kappa T_1$. При попадании электронов на анод энергия электронов будет отдаваться (рассеиваться) на аноде и нагревать его. Скоро температура анода станет равной температуре катода и движение электронов прекратится. Если же анод охлаждать, то движение электронов будет продолжаться, во внешней цепи (через нагрузку) будет протекать ток. Можно показать, что в результате движения электронов от катода к аноду возникнет разность потенциалов (э. д. с.), определяемая соотношением:

$$E = \gamma_e (T_1 - T_2),$$

где γ_e зависит от концентрации электронов и скорости их движения (температуры электронного газа) к аноду. При $T_1 - T_2 = 2500° K$ и концентрации электронов $N_e = 10^{15}$ на 1 *см*^{3} величина $E = 3{,}75$ *в*.

Требование большой концентрации электронов в междуэлектродном промежутке генератора вызывает существенно большую разницу между электронной лампой и генератором. В электронной лампе пространственный отрицательный заряд вблизи катода не является существенным недостатком и во многих случаях даже желателен, а в термоэлектронном генераторе такой заряд может привести к тому, что генератор перестанет действовать. В самом деле, отрицательный пространственный заряд затрудняет эмиссию и ухудшает условия движения электронов к аноду. Поэтому в термоэлектронном генераторе приняты меры к устранению вредного действия пространственного заряда.

Существенным методом устранения вредного влияния пространственного заряда является его нейтрализация положительными ионами, т. е. создание в междуэлектродном пространстве газоразрядной плазмы. При этом электроны не будут рекомбинировать с положительными ионами плазмы, и каждый носитель зарядов (электроны и ионы) будет двигаться со своими скоростями, а суммарный заряд плазмы будет равен нулю. Для такой нейтрализации пространственного заряда в междуэлектродное пространство вводятся пары цезия.

Часть паров цезия ионизируется в результате поверхностной ионизации, заключающейся в следующем. При ударе атома цезия о горячую поверхность катода валентные его электроны могут оказаться связанными с атомами материала катода. В результате валентные электроны от такого атома «отбираются» и атом цезия становится положительным ионом, отскакивающим от поверхности катода. Благодаря большой массе скорость атомов цезия невелика, и тем самым обеспечивается хорошая нейтрализация отрицательного заряда в междуэлектродном пространстве генератора.

Одним из существенных недостатков цезия является его высокая химическая активность, в результате чего спаи стекла и металла быстро разрушаются. Хорошо противостоит действию цезия керамика из чистой окиси алюминия.

Из приведенного краткого описания основных принципов действия термоэлектронных генераторов можно сделать выводы о практическом их осуществлении. Как правило, все конструкции термоэлектронных генераторов имеют преимущественно дисковую форму, приспособленную ко всей установке как в смысле нагрева катода, так и в отношении охлаждения анода. Что касается областей применения таких генераторов, то они могут быть самыми разнообразными. Например, в литературе сообщаются предложения о применении термоэлектронных генераторов для повышения к. п. д. котлотурбинной паросиловой установки. Для этого предлагается в стенки котла вмонтировать батарею термоэлектронных генераторов так, чтобы катоды нагревались, как и водогрейные трубы, за счет сгорания топлива, а аноды охлаждались паром. При этом температура катодов будет около 1500° K, а температура

анодов 820° К. В результате приведенных расчетов указывается на повышение к. п. д. всей паросиловой установки до 49%, а к. п. д. термоэлектронных генераторов составит 16%.

Существуют описания проектов применения термоэлектронных преобразователей в сочетании с установками ядерной энергетики. Например, на рис. 20, *а* показана схема комбинированной термоэлектронной и паросиловой установки на ядерном топливе. Согласно проекту, в качестве ядерного топлива используется окись урана UO_2. Охлаждение преобразователя осуществляется непрерывным протеканием охлаждающей жидкости, являющейся теплоносителем для подогрева воды

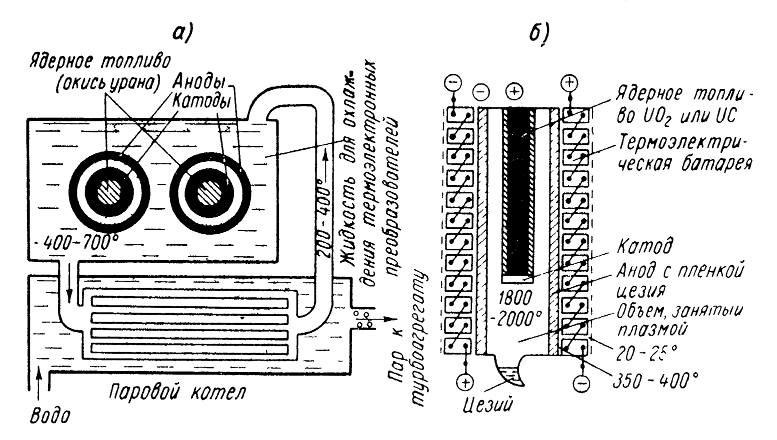


Рис. 20. Комбинированные термоэлектронные устройства: *а* — с паросиловой установкой; *б* — с термоэлектрическим преобразователем.

в паросиловой установке. Проектом предусматривается мощность термоэлектронного генератора в 27 *квт* при к. п. д. в 10%. Общий вес батареи генератора составляет 640 *кГ*.

На рис. 20, *б* показана схема комбинированного термоэлектронного и термоэлектрического преобразователей, где в качестве топлива использовано ядерное горючее (окись урана или карбид урана). Предполагается, что к. п. д. такой установки будет не ниже 35—40%.

В зарубежной литературе имеются сообщения о разработках термоэлектронных генераторов самого различного назначения. Например, сообщается о разработке термоэлектронного генератора мощностью 45 *вт* при общем весе 4,5 *кГ*, в котором нагревание катода осуществляется за счет сжигания бензина. Указывается на возможность осуществления подобного генератора мощностью до 200 *вт*.

Подобный термоэлектронный генератор описывается в литературе для применения на космических кораблях. Генератор мощностью 5 *вт*, весом 400 *Г* в форме цилиндра диаметром и высотой 50,8 *мм* испытывался в течение 2100 *ч* Источником

тепла в нем служил кюрий-242, катод выполнен из пористого вольфрама, анод — из молибдена. При испытаниях катод нагревался электрогрелкой.

6. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Общие сведения

В термоэлектрических генераторах осуществляется непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую. Термоэлектрический эффект известен более 140 лет, но только за последние десятилетия стал практически применяться для преобразования энергии. В простейшем виде термо-

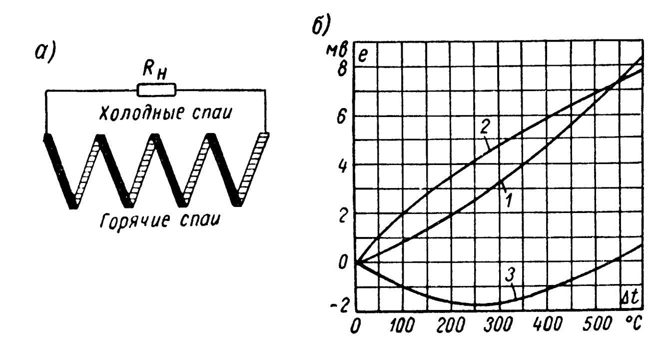


Рис. 21. Простейший термоэлектрогенератор: *а* — схема; *б* — кривые температурной зависимости т. э. д. с.

1 — платина — медь; *2* — платина — железо; *3* — медь — железо.

электрогенератор представляет собой батарею термопар, у которых одни концы спаев подогреваются, а другие охлаждаются. Схематически такой термоэлектрогенератор показан на рис. 21, *а*. Каждая термопара может состоять либо из двух различных металлов, либо из двух различных полупроводников, либо из металла и полупроводника.

Действие термопары заключается в том, что при нагревании одних концов спая и охлаждении других, т. е. при разности температур концов термопары, создается разность потенциалов

$$e = \alpha (t_1 - t_2),$$

где α — коэффициент т. э. д. с., зависящий от материалов термопары; $t_1 - t_2$ — разность температур концов спая

Если внешнюю цепь термопары замкнуть через нагрузку, то по цепи потечет ток. Разумеется, что при одинаковой температуре концов спая, т. е. при $\Delta t = 0$, никакой т. э. д. с.

не будет. О величине т. э. д. с. металлических термопар можно судить по кривым на рис. 21, *б*.

Возникновение т. э. д. с. обусловлено тем, что электроны от горячего места спая, где их концентрация велика, передвигаются к холодному месту спая, где их концентрация меньше. Вместе с передвижением электронов, несущих электрический заряд, происходит также передача тепла от горячих концов спая к холодным концам термопары (эффект Пельтье). Поэтому более точное значение т. э. д. с. будет

$$e = \alpha (t_1 - t_2) \pm \beta (t_1 - t_2)^2,$$

где $\beta \ll \alpha$, что дает возможность часто пренебрегать влиянием второй части уравнения.

Металлические термопары, обладающие значительной теплопроводностью и концентрацией электронов, почти не зависящей от температуры, а также не допускающие большой разности температур концов спая, не обеспечивают получения больших т. э. д. с. Только с появлением полупроводников стало возможным использование термоэлектрического эффекта.

В полупроводниковой термопаре возникновение т. э. д. с. сводится к следующему. В горячем месте спая концентрация носителей зарядов (дырок и электронов) резко возрастает с температурой, причем электроны и дырки в полупроводниках движутся от горячего спая к холодному. Перемещение носителей зарядов приводит к тому, что горячий конец *p*-полупроводника заряжается отрицательно, а холодный — положительно; в *n*-полупроводнике горячий конец спая заряжается положительно, а холодный — отрицательно. В результате т. э. д. с. обоих полупроводников суммируется, и результирующая э. д. с. полупроводниковой термопары в десятки раз выше, чем в металлической термопаре

Поскольку полупроводники обладают меньшей теплопроводностью, чем металлы, то полупроводниковые термопары можно нагревать до значительно более высокой температуры, чем металлические. В результате полупроводниковые термоэлектрические генераторы стали приемлемыми техническими преобразователями тепловой энергии в электрическую. Этому также способствовали и их возможности параллельно-последовательного соединения.

В настоящее время развитие термоэлектрогенераторов идет по трем направлениям: на обычном топливе, в сочетании с атомными реакторами, с приемниками солнечной радиации. Генераторы первого типа известны уже несколько десятилетий. По литературным данным, большая часть существующих материалов термопар обеспечивает наибольший к. п. д., около 17—18%. Практически их к. п. д. снижается до 5%. Начиная с 1963 г., интерес к термоэлектрогенераторам заметно возрос, в особенности к комбинированным системам, т. е. в сочетании с атомными реакторами или приемниками солнечной радиации. В последние годы наряду с чисто конструктивными разработками термоэлектрогенераторов велись исследования новых полупроводниковых материалов (теллурида, селена, нитрида, арсенида и др.), соединений тяжелых элементов (висмута, свинца, теллура),

а также соединений редкоземельных элементов. Высказываются соображения о возможности увеличения к. п. д. термоэлектрогенераторов до 30—35% и получения от них больших мощностей, вплоть до мегаватт.

Виды термоэлектрических генераторов

Термоэлектрогенераторы с обычным топливом. Промышленностью освоен ряд типов и конструкций термоэлектрических генераторов с обычным топливом. Основные данные таких генераторов приведены в табл. 11.

Таблица 11

Обозначение генератора	Электрические данные			Расход керосина, *Г/ч*
	напряжение, *в*	допустимые токи нагрузки, *ма*	мощность, *вт*	
ТЭГК-2—2	80—100 1,2—1,4	10—12 500—600	2,0	60—70
ТГК-3	2	2000	4,0	60—70
ТЭГК-6	6 1,2	130 500	1,0	20—25
ТЭГК-9	9	40—50	0,5	15—20
ТГК-10	10,0 1,2	1000 700	12,0	100—105
ТГУ-1	5,0 1,2	2000 500	12,4	100—110

Схематическое устройство ТГК-3 показано на рис. 22. Источником тепловой энергии служит керосиновая лампа типа «Молния», одновременно используемая для освещения помещения. Внутри стекла лампы, непосредственно над пламенем, находится нижняя часть теплопередатчика *1*, имеющего форму многогранной призмы. Чтобы использовать тепло не только лучеиспусканием, но и конвекцией, теплопередатчик снабжен несколькими продольными каналами *2*. По этим каналам горячие газы поступают в вытяжную трубу *3*, расположенную над теплопередатчиком. Чтобы усилить охлаждение холодных концов термопар, к внешним поверхностям блоков термопар прижаты металлические радиаторные пластины ребра *4*. При нормальном горении лампы температура горячего конца термопар доходит до 380° С, тогда как температура холодных концов термопар не превышает 70—80° С.

Каждая термопара состоит из металлического и полупроводникового элементов. Все термопары соединены в батареи и расположены радиально вокруг нагревателя так, что их

наружные спаи примыкают к ребрам радиатора, а внутренние — к горячей стенке нагревателя.

Термоэлектрогенератор ТГК-3 содержит одну низковольтную батарею, рассчитанную на питание цепей накала и преобразователя напряжения (вибрационного или другого типа) для питания анодных цепей ламп. В случае применения транзисторных радиоустройств их можно питать непосредственно от генератора или с помощью транзисторного преобразователя напряжения постоянного тока.

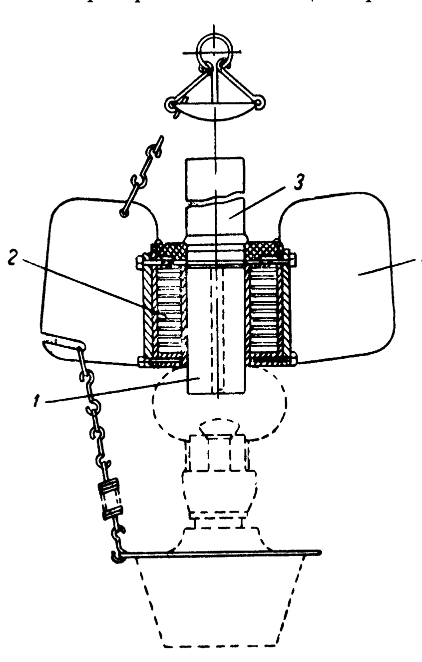


Рис. 22. Схематическое устройство термоэлектрогенератора ТГК-3

Остальные термоэлектрогенераторы, данные которых приведены в табл. 11, отличаются рабочими напряжениями и токами, а также тем, что некоторые из них (например, ТГК-10) нагреваются не осветительной лампой, а керогазом.

В 50-е годы в ряде стран мира, в частности во Франции, конструировались термоэлектрогенераторы с различными системами нагрева блоков термопар. Например, промышленностью Франции производились термоэлектрогенераторы с газовой горелкой. Небольшой баллон газа (бутан) весом 4 *кГ* обеспечивал работу генератора в течение 150 *ч*. Термоэлектрогенератор состоит из двух батарей по 60 термопар, каждая из которых имеет вид полоски 55 × 1,7 × 0,5 *мм*. Т. э. д. с. каждой термопары 0,03 *в* при разности температур в 100° С. Батареи термопар после 2-минутного прогрева обеспечивали рабочее напряжение 1,7 *в* при токе нагрузки 220*ма*, 120 *в* при токе 10 *ма*.

Во время второй мировой войны в войсках США для питания радиоаппаратуры использовался термоэлектрогенератор, состоящий из 168 хромельконстантановых термопар, заключенных в теплоизолирующую керамику. Для нагревания горячих спаев термопар применялась бесшумная бензиновая горелка. Температура горячих спаев поддерживалась около 725° С, а температура холодных спаев — около 93° С. Генератор может работать непрерывно в течение 8 *ч*, расходуя 3,8 *л* бензина. Вес генератора около 5 *кГ*. Срок службы термопар около

2000 *ч* работы. Рабочее напряжение составляет 2,5 *в* при токе нагрузки 2 *а*, внутреннее сопротивление генератора 1,75 *ом*. Генератор использовался для работы с вибропреобразователем для получения высокого напряжения или для зарядки аккумуляторов.

Подобных разработок термоэлектрических генераторов множество. За последние годы опубликован ряд разработок, в том числе следующие. В США разработаны компактные модули из шести последовательно соединенных термопар из сплавов кремния и германия. Такие модули термопар выдерживают непосредственное воздействие выхлопных газов, образующихся при сжигании органического топлива, без герметизации и способны работать при температуре до 850° С, создавая рабочее напряжение в 1,0 *в* при мощности в нагрузке 5 *вт*, и имеют к. п. д. до 7%. При испытаниях в течение нескольких тысяч часов выходная мощность модулей сохранялась неизменной. В зависимости от конкретной конструкции электрогенератора и его назначения можно осуществлять различную компоновку модулей термопар.

В США разработан специальный термоэлектрогенератор на дешевом топливе. Генератор может работать от таких видов топлива, как древесный уголь, древесина, каменный уголь, навоз, торф и др. В генераторе имеются 152 термопары из кремниево-германиевых сплавов, работающих при температуре 825° С (горячий спай) и 225° С (холодный спай). Для отвода тепла используются 73 алюминиевых ребра и естественная конвекция. Термопары соединены в батареи; каждая из двух батарей развивает мощность 84 *вт* при рабочем напряжении 12,0 *в*, к. п. д. генератора составляет 3,4%, общий вес 7,5 *кГ*.

Экспериментальная морская лаборатория США разработала термоэлектрический генератор с выходной мощностью 600 *вт*, весом 14 *кГ* с использованием бензина. Термоэлементы генератора выполнены из теллурида свинца и теллурида германий-висмут.

Другая фирма США разработала генератор для обеспечения электроэнергией различных навигационных средств береговой обороны с выходным напряжением 12 *в*, мощностью 200—300 *вт*, с использованием пропана. При непрерывной работе генератора потребляется около 245 *л* пропана в год. Генератор снабжен транзисторным преобразователем постоянного тока, устройством для автоматического зажигания горелки по мере необходимости заряда никель-кадмиевых аккумуляторов.

О большом внимании, уделяемом дальнейшему развитию термоэлектрогенераторов, можно судить по обилию патентов и заявок на изобретения во всех странах мира. Среди изобретений имеются и такие, которые предусматривают стабилизацию выходной мощности за счет постоянства разности температур горячих и холодных спаев термопар. В ФРГ, например, зарегистрирована патентная заявка на новый принцип создания термобатарей. В основу изобретения положен известный физический эффект, заключающийся в том, что в монокристаллах некубической формы т. э. д. с. зависит от направления протекающего через кристалл тока относительно осей

кристалла. В частности, предложен термоэлемент с неограниченным сроком службы, представляющий собой термопару из *p-n*-полупроводников, вырезанных из кристалла кадмия, в котором в диапазоне температур 0—100° С в направлении главной оси кристаллической решетки возбуждается т. э. д. с. 50 *мкв/град.*

В США в 1963 г. запатентован термоэлемент из одного и того же материала, но одна ветвь термопары находится в области постоянного магнитного поля, чем достигается заметно больший эффект термоэлектричества при подогревании одной части пары и охлаждении другой ее части.

Термоэлектрогенераторы с атомными нагревателями. За последние годы термоэлектрогенераторы, в которых источником тепловой энергии служит ядерная реакция, привлекают внимание разработчиков всех стран мира. Решающее значение имеет то обстоятельство, что для производства электрической энергии за счет радиоактивного распада веществ малой мощности такие генераторы являются чуть ли не единственной возможностью. При этом можно достигнуть больших сроков службы и безопасности пользования такими генераторами. Эти генераторы применяются на космических кораблях, автоматических необслуживаемых радиостанциях удаленных метеостанций и на других подобных установках.

О развитии термоэлектрогенераторов, использующих тепловую энергию радиоактивного распада, можно судить по данным табл. 12, где приведены названия генераторов, разработанных и в США с применением радиоактивных изотопов.

Таблица 12

Обозначение генератора	Радиоактивный изотоп	Число термоэлементов	Мощность, *вт*	Назначение генератора или место использования
АР-1А	Церий-144	277	125	Опытный образец
АР-3	Полоний-210	27	3	То же
АР-3	Плутоний-238	27	2,7	Навигационный спутник «Транзит»
АР-3	Плутоний-238	27	2,7	Спутник «Транзит-IVA»
АР-7А	Стронций-90	60	10,0	Навигационные буи
АР-7В	Стронций-90	120	60	Маяк в Балтиморе
АР-7С	Стронций-90	60	10,0	Метеостанция
АР-7Д	Стронций-90	120	60	Плавучая метеостанция
АР-7Е	Стронций-90	60	6,5	Навигационный маяк
АР-7Е	Стронций-90	60	4,5	Арктическая метеостанция
АР-9А	Плутоний-238	36	25	Спутник «Транзит»
АР-11	Кюрий-242	30	25	Космический корабль «Сервейор»
АР-13	Кюрий-242	36	25	Опытный образец

Во всех этих термоэлектрогенераторах температура спаев около 1000° С у горячих и 400° у холодных. Развиваемое рабочее напряжение зависит от числа термопар, включенных последовательно.

Срок службы такого термоэлектрогенератора зависит от радиоактивного изотопа, примененного в нем. Например, при использовании церия-144 генератор действует в течение года, причем вначале его мощность несколько большая, чем в конце. Это вызывает ряд существенных затруднений и усложнение конструкции.

Конструкции подобных термоэлектрогенераторов весьма разнообразны. Для представления особенностей конструкции таких генераторов можно воспользоваться описанием генератора SNAP-IA. Радиоизотоп заключен в цилиндрический блок диаметром 96 *мм,* длиной 410 *мм.* В блок вставлены семь трубок из нержавеющей стали, заполненных шариками из окиси церия. Заряженный радиоизотопом блок можно перевозить отдельно от всей остальной системы в специальном транспортном контейнере и по мере необходимости устанавливать его в генератор (перед пуском генератора и к концу окончания срока действия). Тепловая энергия радиоактивного распада излучается на внутренние экраны из нержавеющей стали, которые и являются горячими спаями термопар.

В начальный момент действия радиоактивного изотопа его мощность оценивается в 6000 *вт,* а через год работы — в 2700 *вт.* Для регулирования мощности излучения тепловой энергии и постоянства температуры спаев термопар регулируется поверхность облучения, причем регулятором служит специальный клапан, автоматически действующий при помощи паров ртути. О коэффициенте полезного действия генератора можно судить из соотношения мощности излучения и мощности, отдаваемой в полезную нагрузку. Расчетный к. п. д. составляет около 6%.

Упрощение конструкции генератора достигается при использовании более умеренных источников излучения, например цезия-137. Генератор с этим изотопом (США) оказался простым по конструкции и дешевым источником тока для подводных сейсмических станций. В нем использован теллурид свинца, для соединения термоэлементов в батарею применен печатный монтаж, температура спаев, соответственно горячих и холодных, составляла 773° К и 373° К, к. п. д. 14,9%.

В 1964 г. в печати сообщалось об успешном использовании в СССР термоэлектрогенератора с радиоактивным изотопом церий-144 под названием «Бета-1». Этот генератор успешно эксплуатировался, обеспечивая электропитание стандартных автоматических радиометеорологических станций. В генераторе использованы термоэлементы из низкотемпературных полупроводниковых сплавов, обладающих хорошими характеристиками в интервале температур 2 0—260° С. При работе в сочетании с аккумуляторами генератор в состоянии обеспечить до 150 *вт* мощности, необходимой для работы радиопередатчика с радиусом действия 300—700 *км* при повторно-кратковременном включении.

Термоэлектрогенераторы с ядерными маломощными реакторами менее широко распространены в силу того, что даже при хорошей их конструкции должны быть приняты сложные меры безопасности для окружающих и эксплуатационного персонала. В специальной зарубежной литературе имеются многочисленные сообщения об испытаниях подобного рода генераторов. Имеется среди сообщений и сообщение о результатах испытаний. Например, указывается, что генератор мощностью 2,5 *квт*, содержащий 1322 термоэлемента, испытывался в течение 18 месяцев и за это время было только одно незначитель-

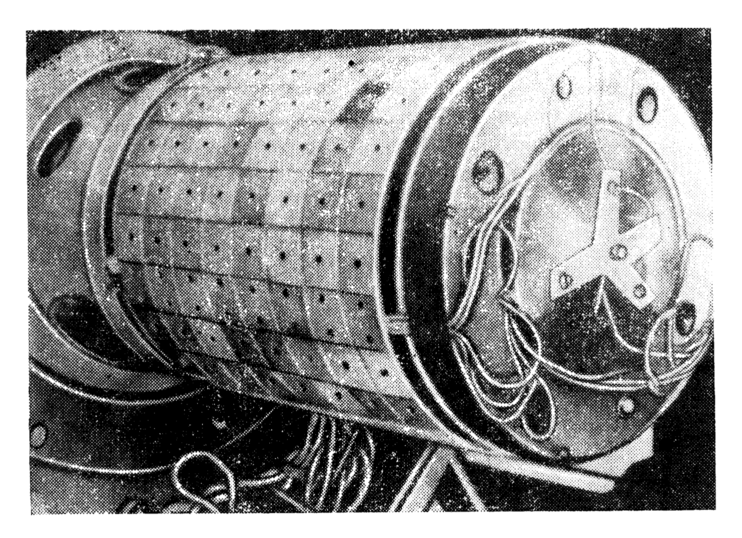


Рис. 23. Термоэлектрогенератор «Ромашка».

ное повреждение. Что касается конструкций, то они достаточно сложны и их подробное описание не приводится

В качестве примера термоэлектрогенератора с ядерным реактором можно привести генератор «Ромашка». Внешний вид этого генератора показан на рис. 23. В нем тепло получается за счет распада урана-235 в активной зоне реактора. Цилиндрическая активная зона реактора состоит из пластинчатых тепловыделяющих и графитовых конструкций. Активная зона окружена бериллиевым отражателем, который возвращает быстрые нейтроны в активную зону и обеспечивает начало цепной реакции. Температура в центре активной зоны превышает 2000° К. Для поддержания заданной мощности излучения имеется автоматическое регулирующее устройство.

С наружной стороны отражателя установлены термоэлементы, подогреваемые выделяющимся в реакторе теплом и нагревающиеся до 1300° К. Вторые концы спаев находятся при значительно более низкой температуре.

Термоэлектрогенератор обеспечивает ток в 88 *а* при мощности около 500 *вт*.

Термоэлектрогенераторы с приемниками солнечной радиации. Использование тепловой энергии Солнца известно давно. В очень давние времена этим теплом нагревали воду для бытовых нужд и других целей. Многие годы уже существовал термин гелиотехника. Были построены специальные гелиотехнические сооружения, но преобразование тепловой солнечной энергии в электрическую — относительно новая отрасль гелиотехники. До сих пор существуют огромные трудности в преобразовании тепловой энергии в электрическую без промежуточных звеньев, какими служат тепловые машины и электромашинные генераторы. Только сочетание гелиотехнических устройств с термоэлектрическими генераторами является радикальным решением использования солнечной радиации в установках сравнительно небольшой мощности. Естественен и другой путь преобразования — использование фотоэлектрических преобразователей, о чем речь пойдет ниже.

В СССР разработан гелиотермоэлектрогенератор, в котором концентратором тепловой энергии служит не одно большое зеркало, а несколько алюминиевых рефлекторов, каждый размером с автомобильную фару. В фокусе каждого такого рефлектора размещен термоэлемент, причем его горячий спай находится в фокусе рефлектора и нагревается сконцентрированными лучами солнца, а холодный спай охлаждается за счет рассеяния тепла отражателем в окружающее пространство, поскольку площадь металлического рефлектора сравнительно велика. Электрическая цепь каждого термоэлемента может быть использована как часть последовательной или параллельной схемы.

В США среди многих других конструкций солнечных термоэлектрогенераторов имеется и следующий. В нем генератор помещен в фокусе зеркала диаметром 1,5 *м*, концентрирующем поток солнечной энергии, направляемый в полость через шестую грань конструкции, в остальные пять граней которой вмонтированы батареи термопреобразователей. Вес самого генератора с термоэлементами составляет 1,5 *кГ*, а вместе с зеркалом 9 *кГ*. Горячие спаи термоэлементов нагреваются до 1700° С, а холодные спаи имеют температуру 600° С и охлаждаются путем теплового излучения в окружающее пространство. На испытаниях генератор вырабатывал 62 *вт* при напряжении 4,8 *в* и имел к. п. д. 4,5%; 75 *вт* при напряжении 3,5 *в* и имел к. п. д. 6,2%.

Высказаны предположения, что, сгруппировав на борту космического корабля несколько таких генераторов, можно довести общую мощность системы до 500—1000 *вт*.

Другая американская фирма сообщила о разработке для космических кораблей термоэлектрического генератора мощностью 10 *вт*, использующего солнечную энергию в двух видах: непосредственно воспринятую и запасенную. При наличии солнечного света энергия излучения направляется параболическим рефлектором в полость термоэлектрогенератора. Часть направляемой энергии преобразуется непосредственно

в электрическую энергию, а вторая часть энергии нагревает гидрат лития, которым покрыта внутренняя поверхность полости генератора. При нагревании и расплавлении гидрата лития аккумулируется большое количество тепловой энергии, используемое для нагрева термопар генератора при отсутствии солнечного света.

Примеров, подобных описанным, имеется множество. Все эти примеры характеризуют усиленное внимание к подобным источникам электрического тока. Разумеется, что в обычных условиях эксплуатации солнечные термоэлектрогенераторы могут оказаться неконкурентными с другими источниками тока. Однако в условиях ряда областей страны, где солнечная радиация весьма интенсивна, такие генераторы могут быть весьма рациональными источниками электрического питания радиоустройств, в особенности транзисторных.

7. СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

Солнечные батареи — условное название приборов, преобразующих лучистую энергию солнца в электрическую энергию. Основу этих преобразователей составляют полупроводниковые фотоэлементы, в том числе с кремниевыми или интерметаллическими соединениями типа A_3B_5. Такие фотоэлементы принято называть фотоэлементами вентильного действия. Как и в других полупроводниковых приборах, основную роль в процессе преобразования энергии играет *n-p*-переход. При отсутствии освещения суммарный ток через *n-p*-переход равен нулю, так как токи основных и неосновных носителей зарядов взаимно компенсируются. При освещении полупроводника фотоны лучистой энергии отдают часть своей энергии валентным электронам, увеличивая тем самым уровень их энергии до величины, необходимой для перехода в зону проводимости. При этом в месте, откуда ушел электрон из заполненной зоны, образуется дырка. В результате действие фотонов света приводит к возникновению парных зарядов электрон — дырка. В результате разности концентрации носителей зарядов — электронов и дырок возрастает движение их и на электродах фотоэлемента возникает э. д. с. Под воздействием возникшей э. д. с. в нагрузке замкнутой внешней цепи фотоэлемента возникает ток, приблизительно пропорциональный интенсивности освещения. Следовательно, фотоэлемент подобно, например, гальваническому элементу является преобразователем энергии лучистой в электрическую.

Эффективность действия преобразователя энергии зависит в значительной мере от его спектральной характеристики и спектрального состава лучистой энергии. Характерной особенностью кремниевых фотоэлементов является совпадение максимума его чувствительности с тем участком спектра солнечного излучения, в котором наблюдается наибольшая интенсивность излучения, как это видно из рис. 24, *а*. Здесь кривая *1* — спектральная характеристика солнечной радиации; кривая *2* — спектральная характеристика селенового фотоэлемента, а *3* — кремниевого фотоэлемента.

Обычно совпадение максимумов излучения и чувствительности кремниевого фотоэлемента совпадают на границе видимого и инфракрасного излучений, т. е. при длине волны $\lambda = 0{,}75$ *мк*. Поскольку красная часть спектра проходит сквозь облака, такие преобразователи могут работать не только в солнечные дни, но и в облачные, правда, отдавая несколько меньшую мощность.

На рис. 24, *б* показана зависимость э. д. с преобразователя от температуры окружающей среды и интенсивности освещения. Из этих характеристик следует: возрастание интенсивности освещения приводит к пропорциональному возрастанию э. д. с.; повышение температуры окружающей среды приводит к пропорциональному уменьшению э. д. с. Цифры на характе-

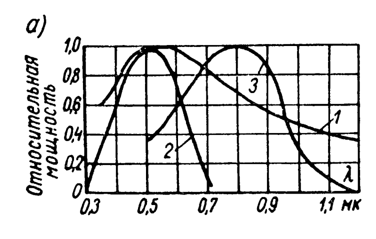


Рис. 24. Характеристики фотоэлементов солнечных батарей: *а* — спектральные характеристики; *б* — зависимость э. д с. фотоэлемента от температуры.

Спектральные характеристики: *1* — солнечной радиации; *2* — селенового фотоэлемента, *3* — кремниевого фотоэлемента (цифры у линий рис. *б* — освещенность, *вт/м²*).

ристиках рис. 24, *б* означают интенсивность освещенности, причем нормальная мощность солнечной радиации принята равной 750 *вт/м²*.

На основании характеристик рис. 24, *б* можно сделать заключение о том, что работа солнечных элементов и батарей в условиях повышенной температуры окружающей среды приводит к заметному падению напряжения на нагрузке, изменению внутреннего сопротивления и снижению отдаваемой в нагрузку мощности. Этим можно объяснить, например, частые отказы в работе солнечных батарей на космических кораблях, где не сохраняется постоянство температуры.

Выпускаемые в настоящее время солнечные батареи имеют к. п. д. 6—8%, отдают в нагрузку 0,6—0,7 *вт* на 1 *дм²* освещаемой поверхности. Если учесть, что в реальных условиях солнечная батарея не всегда ориентирована на Солнце, то с нее практически можно получить в солнечный день 0,15—0,2 *вт/дм²*, что при средней продолжительности дня в 10 *ч* может обеспечить 1,5—2 *вт·ч/сутки*.

Промышленные образцы кремниевых фотоэлементов типа ФКД-2 — ФКД-5 представляют собой пластинки 10 × 10, 10 × 15, 10 × 20 и 10 × 30 *мм* с поверхностями 0,85—2,4 *см²*,

обеспечивая ток нагрузки 18—50 *ма* при напряжении 0,4 *в*. В зарубежных странах наряду с широко распространенными кремниевыми фотоэлементами пластинчатой формы используются также и дисковые фотоэлементы, которые по своей структуре и принципу действия ничем не отличаются от пластинчатых. Как правило, *p*-проводимость в кремнии создается путем длительной выдержки его при высокой температуре в присутствии газообразного бора.

Солнечные батареи обычно содержат необходимое число фотоэлементов, соединенных по последовательно параллельным схемам. Как правило, солнечные батареи применяются в сочетании с аккумуляторами или транзисторными преобразователями напряжения постоянного тока.

На выставке достижений народного хозяйства СССР демонстрировались среди других экспонатов две солнечные батареи, состоящие из 12 и 19 пластинчатых фотоэлементов, соединенных последовательно. Первая батарея нагружалась током 20 *ма* при напряжении 5 *в*, вторая — током 40 *ма* при напряжении 7 *в*. Там же демонстрировалась солнечная батарея для электропитания радиоустройств в геологических партиях в виде набора фотоэлементов с выходной мощностью до 100 *вт*.

В США разработке солнечных батарей уделялось до последнего времени большое внимание в связи с развитием космонавтики. Например, в аппаратуре спутника «Рейнджер-IV» установлена солнечная батарея из 8680 кремниевых фотоэлементов с выходной мощностью 175—205 *вт*. Имеются еще многочисленные примеры создания подобных солнечных батарей. Однако нельзя не отметить развивающуюся тенденцию использования комбинированных преобразователей энергии, подобных описанным выше солнечным термоэлектрогенераторам и другим, в том числе и солнечным, термоэлектронным генераторам. Эти тенденции развития комбинированных источников тока за счет преобразования энергии обусловлены стремлением повысить надежность действия и увеличить удельную энергию как по весу, так и по объему Заметны также тенденции перехода к более эффективно действующим преобразователям лучистой энергии в электрическую.

Ряд организаций и фирм США сообщили о результатах экспериментальных работ с тонкопленочными фотоэлектрическими элементами, в том числе с элементами из сульфида кадмия и теллурида кадмия, полученными вакуумным и химическим методами. При этом выяснилось, что элементы из сульфида кадмия отличаются большим отношением мощности к весу, но имеют низкий к. п. д. при больших рабочих поверхностях и небольшой срок службы Толщина пленки сульфида кадмия составляет около 1 *мк*, т. е. на порядок меньше толщины полупроводникового материала в других тонкопленочных элементах.

В ряде стран запатентованы батареи преобразователей новой конструкции с целью повышения выходного напряжения. Одни из них изготовляются набором фотоэлементов, активированных только с одной стороны и расположенных так, что заряд, получаемый при освещении каждого из них, повышал по абсолютной величине отрицательный потенциал

следующего фотоэлектрода, который со своей тыловой стороны является коллектором электронов, а с лицевой (активированной) стороны образует объемный заряд, увеличивающий потенциал следующего электрода. Таким образом, в этих батареях заложен принцип своеобразного каскадного действия, подобного действию фотоэлектронных умножителей.

Повышение к. п. д. преобразователей предлагается достигнуть размещением *п-р*-переходов вдоль силовых линий магнитного поля, что даст возможность получить дополнительную разность потенциалов за счет фотомагнитного эффекта.

Для повышения к п. д. преобразователей запатентован также метод создания светочувствительного элемента с органической краской, например фталеинового ряда. Имеются также запатентованные предложения для преобразования энергии применять солнечные элементы в сочетании с эффектом фотогальванизации.

Разработаны плоские «термоэлектрические солнечные элементы», которые значительно легче и дешевле существующих кремниевых преобразователей Новые преобразователи состоят из двух алюминиевых пластин толщиной 0,025 *мм*, между которыми на расстоянии около 25 *мм* друг от друга расположены термоэлектрические элементы длиной 2,5 *мм* с сечением 2×2 *мм*. Термоэлементы сделаны из теллурида висмута Одна из алюминиевых пластин со специальным покрытием поглощает солнечную энергию и преобразует ее в тепловую, часть которой при прохождении через термоэлементы преобразуется в электрическую энергию. Неиспользованное тепло излучается в окружающее пространство второй алюминиевой пластиной Таким образом такие элементы отличаются от обычных фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии. Эти батареи в несколько десятков раз легче и дешевле обычных.

Имеются также сообщения о разработках преобразователей солнечной энергии с накоплением тепла с таким расчетом, чтобы обойтись без электрических аккумуляторов. Один из таких методов, о котором упоминалось выше, заключается в использовании тепла для расплавления лития. Для этого небольшой железный или титановый контейнер с твердым литием крепится к коллекторной пластине. При отсутствии солнечного освещения термоэлементы работают за счет тепла, выделяемого при затвердении лития.

Для повышения выходной мощности полупроводниковых преобразователей солнечной энергии запатентованы устройства, в которых применяются оптические системы, расположенные над соответствующим *п-р*-переходом преобразователя. Так как в солнечных батареях применяется множество элементов, то для упрощения технологии изготовления оптической системы, состоящей из большого числа линз, расположенных параллельными рядами, ее выполняют в виде одной общей пластины.

Преобразователи солнечной энергии в электрическую несомненно имеют ряд преимуществ перед другими источниками тока. Однако из-за высокой стоимости они недостаточно

широко применяются. Несомненно, что со временем такие преобразователи могут конкурировать с самыми распространенными источниками тока.

8. АТОМНЫЕ БАТАРЕИ

Атомные батареи, служащие для преобразования энергии радиоактивного распада в электрическую энергию, стали известными 10—15 лет назад. Им придавалось вначале большое значение как перспективным источникам тока малой мощности с очень большим сроком службы. На первых порах в батареях предполагали использовать не очень мощные

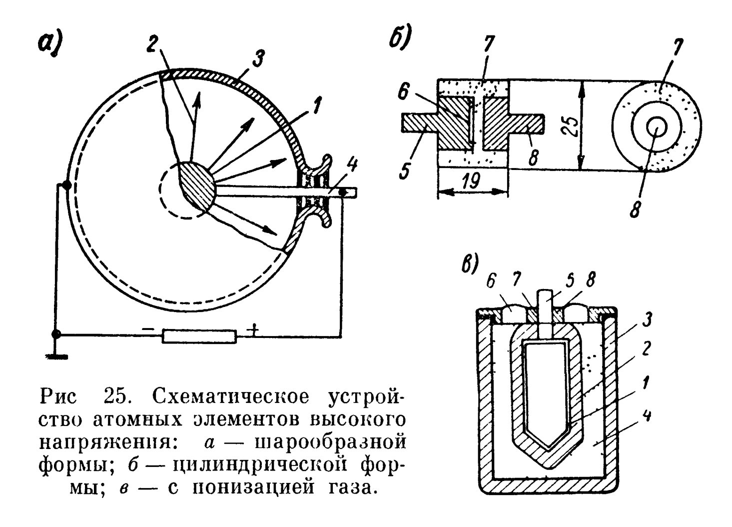


Рис 25. Схематическое устройство атомных элементов высокого напряжения: *а* — шарообразной формы; *б* — цилиндрической формы; *в* — с ионизацией газа.

источники радиоактивных излучений. Практически такие батареи не нашли применения из-за ряда свойственных им недостатков. Однако за последние годы вновь возникли технические возможности работы в этом направлении и, поскольку это очень перспективно, ими занимаются во всем мире

Первоначально разработанные атомные батареи подразделялись на два вида: высоковольтные и низковольтные. Первые из них имели типичную конструкцию, схематически показанную на рис 25. Радиоактивное вещество нанесено на поверхность внутреннего металлического электрода *1*. Электроны *2*, излученные радиоактивным веществом, попадают на внешний металлический электрод *3* и заряжают его отрицательно по отношению к внутреннему электроду, от которого сделан внешний вывод *4*, изолированный от внешнего металлического электрода. Максимальное напряжение, до которого может быть заряжен описываемый своеобразный конденсатор, каким по существу является батарея, зависит от энергии элек-

тронов, излучаемых радиоактивным веществом. Это напряжение может достигать десятков киловольт.

Допустимая величина тока нагрузки высоковольтной батареи зависит от скорости распада используемого радиоактивного вещества, т. е. от числа атомов, распадающихся в течение секунды. Известно, что различные радиоактивные вещества характеризуются постоянной времени, так называемым периодом полураспада, т. е. временем, в течение которого распадается половина первоначального вёщества. Эта постоянная времени для разных веществ исчисляется от долей секунды до десятков миллиардов лет. Очевидно, что чем больше период полураспада, тем дольше может служить атомная батарея, но тем меньшее число атомов распадается в единицу времени и, стало быть, тем меньше возможный ток нагрузки

Описанная в литературе модель атомной батареи высокого напряжения состоит из крупинки радиоактивного изотопа стронция-90 активностью 10 *мкюри* *, помещенной в цилиндрическую капсулу из специального высококачественного диэлектрика (полистирена) диаметром 10 *мм,* длиной 20 *мм* и с толщиной стенок 0,8 *мм.* Одним электродом служит проводник, соединяющий крупинку стронция с выводным зажимом, а другим — алюминиевая чашечка, окружающая капсулу и собирающая электроны, излученные стронцием. Весь элемент помещен в защитный толстостенный цилиндр, предохраняющий обслуживающий персонал от воздействия радиоактивного излучения. Так как период полураспада стронция равен 25 годам, то такая батарея может служить без перезарядки 20—25 лет. За это время мощность батареи снизится вдвое, причем падение мощности в нагрузке произойдет из-за уменьшения тока при почти неизменном напряжении.

Если разомкнуть внешнюю цепь описываемой батареи, т. е. оставить ее ненагруженной, то напряжение на зажимах батареи достигнет 7000 *в.* Максимальный ток нагрузки не должен превышать 40 *мка,* т е. такую батарею можно использовать лишь в таких устройствах, которые практически не потребляют энергии, например цепи ускоряющих электродов электроннолучевых трубок.

Другая конструкция высоковольтного атомного элемента показана на рис. 25, *б.* На торце массивного электрода *5* помещен препарат радиоактивного стронция *6* Цилиндр *7,* являющийся корпусом прибора, служит изолятором между электродами *5* и *8.* Внутри он снабжен тонкой перегородкой; цилиндр и перегородка сделаны из полистирена.

Если толщина перегородки 0,5 *мм* и активность радиоактивного препарата составляет 25 *мкюри,* то допустимый начальный ток нагрузки равен $1{,}1 \cdot 10^{-11}$ *а* и предельное напряжение на элементе равно 3700 *в*; при радиоактивном препарате в 54 *мкюри* напряжение повышается до 6600 *в.*

Основным недостатком описанных атомных батарей высокого напряжения является их малая мощность. При исполь-

* *Кюри* — единица измерения ионизирующего излучения — служит также мерой количества радиоактивного вещества, испускающего за одну секунду столько же частиц, сколько испускает 1 *г* радия, т. е. $3{,}7 \cdot 10^{10}$.

зовании стронция мощность батарей составляет около $5 \cdot 10^{-3}$ *вт/кюри*. Следовательно, чтобы получить мощность в 1 *вт*, требуется 200 *кюри* радиоактивного вещества, что практически нереально по стоимости и методам защиты от его вредного действия.

В атомных батареях высокого напряжения имеются и такие, в которых радиоактивное излучение используется для ионизации газа или создания вторичной эмиссии носителей зарядов с целью увеличения допустимого тока нагрузки. Одна из таких батарей показана на рис. 25, *в*. Здесь стеклянный баллон *2* с внутренней посеребренной тонкой стенкой *1* наполняется газом (криптон-85) под давлением, и в нем же находится радиоактивный изотоп. Внутренний баллон укрепляется на крышке латунного цилиндра *3*, причем пространство между цилиндром и стеклянным сосудом заполнено порошкообразным или жидким токопроводящим материалом *4*. Внутренняя токопроводящая оболочка *1* соединена с металлическим выводом *5*, закрепленным на крышке через изоляционную шайбу *6* и металлическую шайбу *7*.

Слой диэлектрика достаточно тонок (0,2 *мм*), чтобы через него могли пройти электроны, излученные радиоактивным изотопом, а вторичные электроны, выбиваемые из токопроводящего материала *4*, пройти не могут и создают на стенках цилиндра *3* отрицательный потенциал. Нагрузка включается между стенкой цилиндра *3* и зажимом *5*. Согласно литературным данным, батарея обеспечивает напряжение 10 *кв* при токе нагрузки 2 *мка*.

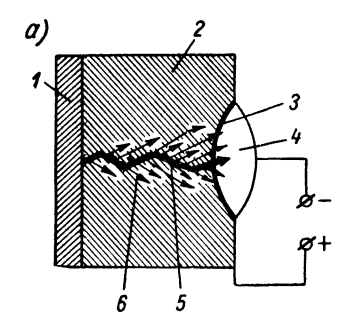
Значительно более эффективны атомные батареи низкого напряжения, действие которых основано на умножении носителей зарядов в *n-p*-переходе. Схематическое устройство такого атомного элемента показано на рис. 26, *а* Радиоактивный стронций нанесен на одну сторону полупроводниковой пластины, на другой стороне которой имеется *n-p*-переход Быстрые электроны, обладающие большой кинетической энергией, излучаемые радиоактивным стронцием в процессе его распада, проникают в слой полупроводника, создавая в нем в среднем $2 \cdot 10^5$ медленных электронов, которые вследствие односторонней проводимости *n-p*-перехода скапливаются на коллекторе диода. В результате такого скопления электронов на коллекторе диода на нем создается разность потенциалов, создающая ток в нагрузке.

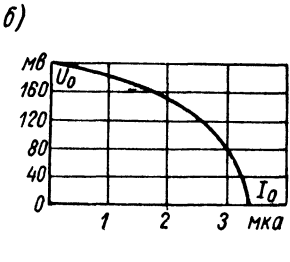
Описанный в литературе атомный элемент низкого напряжения диаметром 10 *мм* и длиной 10 *мм* обеспечивает ток 5 *мка* при напряжении 0,2 *в*. Нагрузочная характеристика элемента приведена на рис. 26, *б*. Из нее видно, как падает напряжение с увеличением тока нагрузки. Батарея описанных элементов использовалась для питания транзисторного генератора звуковой частоты.

Другая атомная батарея, подобная описанной, использовалась для питания наручных электрочасов и слуховых аппаратов. Схематическое устройство этой батареи показано на рис. 26, *в*. В ней в качестве радиоактивного источника использован прометий-147, воздействующий на слой фосфора, а возникающее при этом свечение вызывает возбуждение э. д. с.

на зажимах кремниевого фотоэлемента. Батарея развивает напряжение около 1,0 *в* при токе нагрузки 2 *мка*. Срок службы батареи около 3 лет.

Существенным недостатком атомных элементов низкого напряжения является то, что помимо β-частиц, защиту от которых можно обеспечить сравнительно легко, они излучают также и сильно проникающие γ-лучи, защита от которых довольно сложна. Тем не менее разработка подобных батарей





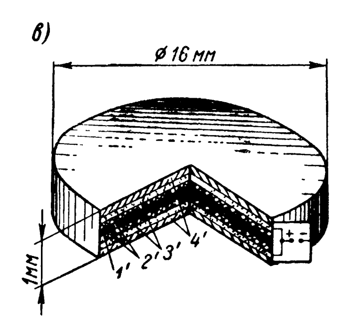


Рис. 26. Атомные батареи низкого напряжения: *а* — схематическое устройство с одним *n-p*-переходом; *б* — нагрузочная характеристика; *в* — миниатюрная батарея для электрочасов.

1 — радиоактивный слой стронция; *2* — полупроводник; *3* — слой типа *n-p*; *4* — коллектор; *5* — путь электрона, излученного стронцием; *6* — путь электрона, выбитого из полупроводника. *1'* — изотоп прометия-147, *2'* — люминофор, *3'* — положительный слой кремниевого фотоэлемента; *4'* — отрицательный слой кремниевого фотоэлемента.

продолжается. Одна из разработанных за последние годы атомных батарей схематически показана на рис. 27, *а*. Здесь батарея образована из четырех столбиков полупроводниковых элементов *1*, соединенных по параллельно-последовательной схеме. Для последовательного соединения элементов примыкающие одна к другой торцовые грани *2* соседних элементов металлизируют, покрывая их в вакууме тонким слоем напыленной меди. Столбики соединяются параллельно шинам *3*, к которым подключается нагрузка *4*. Между собой столбики изолированы слоем тонкой полимерной пленки *5*. В качестве источника излучения используется радиоактивный изотоп *6*, заполняющий узкие щели между столбиками. Как сообщается, рабочее напряжение такой батареи составляет около 100 *в*, а ток нагрузки допустим до 1—2 *ма*.

На рис. 27, *б* показано схематическое устройство батареи для автономного питания транзисторных радиоустройств малой мощности. Между брусками кремния *1—2* в изоляционной оболочке *3* размещен радиоактивный эмиттер *4*. На поверхности брусков *1—2* образованы области *5* с *n*-проводимостью. Таким образом, в этой батарее имеется четыре *n-p*-перехода, причем все четыре элемента соединены последовательно. Батарею охватывает постоянный магнит *9*, создающий в области *n-p*-переходов сильное магнитное поле, посредством которого производится разделение электронов и дырок, образующихся при радиоактивном облучении. Применение магнитной сепарации электронов и дырок повышает к. п. д. батареи.

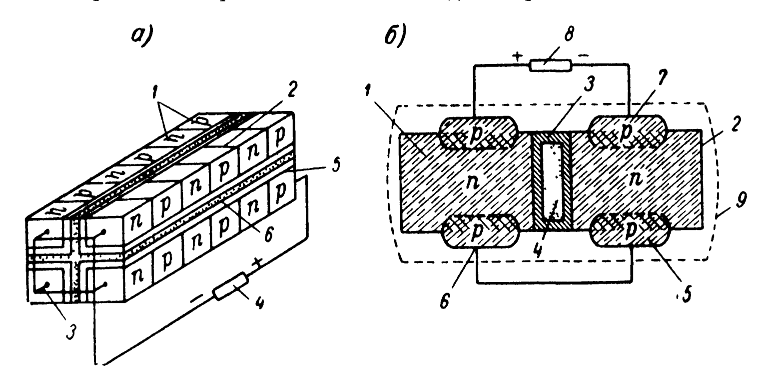


Рис. 27. Схематическое устройство низковольтных атомных батарей: *а* — на 100 *в*; *б* — четырехэлементная.

Как указывалось выше, тенденция объединения источников радиоактивного излучения и энергии ядерных реакций с термоэлектрогенераторами и другими преобразователями представляется более плодотворным и практичным видом преобразования энергии, чем описанные атомные батареи. Тем не менее не исключен дальнейший прогресс в создании подобных батарей и их рациональном применении для электропитания радиоустройств.

9. МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Магнитогидродинамические генераторы, или, как их сокращенно называют, МГД-генераторы, еще не получили промышленного и практического распространения. О них говорят, как о генераторах будущего. Эти генераторы нельзя себе сейчас представить маломощными, используемыми для электропитания радиоустройств.

Принцип действия МГД-генераторов в самом общем виде не отличается от принципа действия обычных электромашинных генераторов, о чем можно судить по схеме рис. 28, *а*. В обоих типах генераторов имеется постоянное магнитное

поле. В электромашинном генераторе механически вращается якорь, пересекающий магнитное поле, за счет чего в обмотке якоря индуктируется э. д. с. и при замкнутой внешней цепи создается ток в полезной нагрузке $R_н$. В МГД-генераторе магнитное поле пересекает жидкость, движущаяся перпендикулярно к магнитным силовым линиям, как показано на рис. 28, *а*, в направлении, перпендикулярном к плоскости чертежа. При

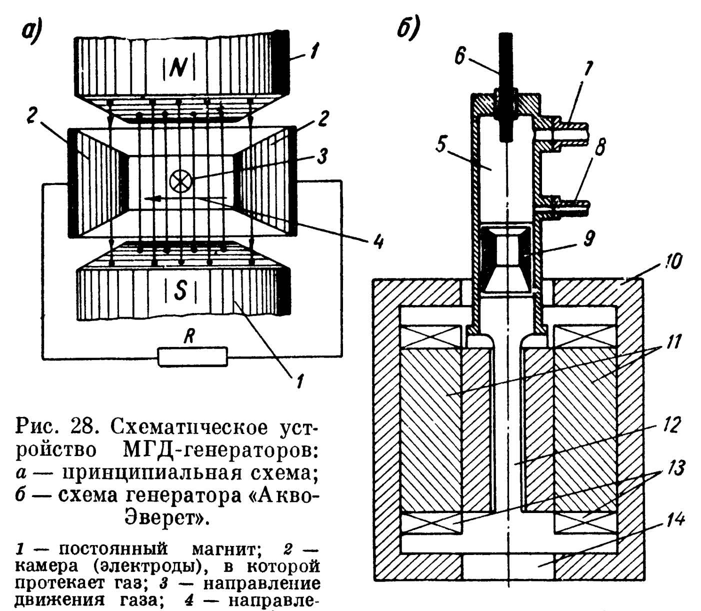


Рис. 28. Схематическое устройство МГД-генераторов: *а* — принципиальная схема; *б* — схема генератора «Акво-Эверет».

1 — постоянный магнит; *2* — камера (электроды), в которой протекает газ; *3* — направление движения газа; *4* — направление электрического поля; *5* — дуговая камера плазмотрона; *6* — электрод для создания дуги; *7* — подвод аргона; *8* — подача карбоната калия; *9* — второй электрод для создания дуги, одновременно служащий соплом; *10* — корпус генератора; *11* — электромагниты; *12* — канал генератора (электроды для отвода генерируемого тока не показаны); *13* — обмотки электромагнитов; *14* — выход газа из генератора.

взаимодействии токопроводящей жидкости (или газа) с магнитным полем на электродах *2* индуктируется э. д. с. и во внешней цепи потечет ток. В данном случае электроды *2* играют роль щеток в машинном генераторе.

Использование в качестве движущегося токопроводящего потока морской воды явно не удовлетворяет основным инженерным требованиям. Значительно более плодотворной оказалась идея использования потока токопроводящего (ионизированного) газа. В таком случае протекание одного и того же газа можно сделать принудительным, используя вспомогательные установки для ионизации газа, нормирования его давления и скорости истечения. В результате можно генерировать весьма большие мощности при значительном к п д. установки, не имея вращающихся и трущихся частей, а срок службы

такого генератора может быть сколь угодно большим в зависимости от долговечности вспомогательных устройств. Разумеется, что при техническом осуществлении этой принципиальной идеи имеется ряд серьезнейших трудностей. Например, трудно придать газу нужную электрическую проводимость при обычных методах ионизации. Использование же термических методов ионизации, т. е. путем его нагревания, вынуждает применять жаростойкие материалы, которых практически почти не существует в настоящее время. Например, при термоионизации чистого аргона необходима температура 4000° К, т. е. превышающая температуру плавления графита. Однако добавление к аргону 1% цезия, который сам по себе очень легко ионизируется, снижает необходимую температуру газа до 1580° К. Эта температура уже практически достижима. Что касается необходимых проводников и изоляторов, способных выдерживать такие температуры, то их изготовление не представляется сейчас неразрешимой задачей.

Ряд организаций и фирм США приступили уже в 1959 г. к изготовлению опытных образцов МГД-генераторов. Один из первых экспериментальных генераторов мощностью в 10 *квт* был разработан в лаборатории фирмы «Акво-Эверет». Схематическое устройство этого генератора показано на рис. 28, *б*. Аргон и порошок карбоната калия K_2CO_3 вводятся в камеру при давлении около 6 *атм,* где они перемешиваются и нагреваются при помощи электрической дуги до температуры 3000° К. При этом карбонат калия диссоциирует и свободный калий частично ионизируется, сообщая всему газу необходимую электрическую проводимость. В сопле газ приобретает большую скорость, и с этой скоростью проходит через прямой канал между полюсами магнита. Затем газ поступал в выхлопную трубу и выводился в окружающее пространство.

В экспериментальной установке дуговая камера и канал генератора не охлаждались, и установка не могла работать более 5 *сек* подряд. Однако при установлении процессов генерирования за доли секунды удалось измерить все необходимые параметры установки. На основании полученных данных был построен второй экспериментальный генератор «Марк-II» мощностью до 205 *квт*. В дальнейшем при незначительных изменениях мощность генератора была доведена до 600 *квт*. Аналогичные работы ведутся в Англии, Польше и других странах мира.

10. НЕУПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Общие сведения

Неуправляемые выпрямители, широко распространенные устройства для выпрямления переменного тока обеспечивают напряжение на нагрузке

$$U_0 = kU_2,$$

где k — коэффициент, зависящий от схемы выпрямления; U_2 — действующее напряжение на входе выпрямителя.

Поскольку современная система энергоснабжения осуществляется широко распространенными сетями переменного тока частотой 50 *гц,* то такие выпрямители являются основными вторичными источниками тока и применяются для электропитания самых разнообразных радиоэлектронных устройств стационарного типа как малой, так и большой мощности. Наряду с выпрямителями промышленной частоты во многих специальных установках, где имеются соответствующие источники тока, используются выпрямители повышенной частоты (400 и 800 *гц*).

Типовые неуправляемые выпрямители малой мощности содержат силовой трансформатор, обеспечивающий необходимое напряжение U_2 и питание цепей накала электронной лампы радиоустройства и вентилей выпрямителя, необходимую вентильную группу и сглаживающий фильтр. Возможны также маломощные бестрансформаторные выпрямители, у которых из-за отсутствия силового трансформатора нельзя получить любое выпрямленное напряжение U_0, и для питания цепей накала электронных ламп и кенотронов приходится соединять эти цепи последовательно с гасящим сопротивлением и питать непосредственно от сети.

Такие выпрямители широко известны. Равным образом известны используемые при этом кенотроны и полупроводниковые вентили. Как редкое исключение, в таких маломощных выпрямителях используются газотроны.

Сглаживающий фильтр маломощных выпрямителей чаще всего выполняется как *RC*-фильтр, реже — как *LC*-фильтр. Возможны также случаи использования современных электронных фильтров с электронными лампами или полупроводниковыми приборами.

В неуправляемых выпрямителях малой и средней мощности (до 500 *вт*) используются стабилизаторы напряжения и тока. Чаще всего используются стабилизаторы напряжения постоянного тока компенсационного типа с электронными лампами или транзисторами, в зависимости от величины стабилизирующего напряжения. В этих случаях все выпрямительное устройство может быть сделано управляемым.

Как известно, находят применение и газоразрядные стабилизаторы переменного тока. Как правило, такие маломощные стабилизаторы используются в измерительной аппаратуре широкого применения (вольтметры, генераторы стандартных сигналов и т. п.).

Схемы выпрямителей

Обычные схемы выпрямления. Широко распространенные схемы выпрямления неуправляемых выпрямителей приведены на рис. 29. Все схемы показаны с активной нагрузкой (без фильтров) для возможности сопоставления их свойств. С этой целью также предположены отсутствие в них потерь и применение одинаковых типов вентилей. Сравнение основных показателей схем рис. 29 можно сделать по табл. 13.

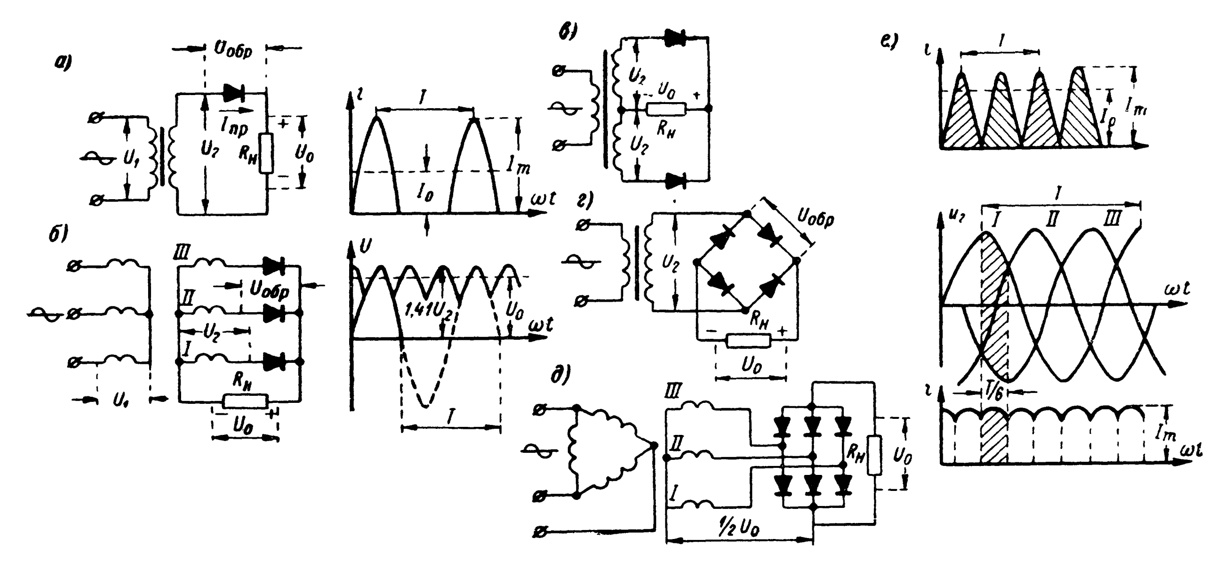


Рис. 29. **Основные схемы** выпрямителей с активной нагрузкой: *а* — однофазная однотактная; *б* — трехфазная однотактная; *в* — однофазная двухтактная со средним выводом; *г* — однофазная мостовая; *д* — трехфазная мостовая; *е* — графики тока и напряжения для трехфазной схемы.

Таблица 13

Определяемая величина и ее обозначение	Однотактные выпрямители		Двухтактные выпрямители		
	одно-фазная	трех-фазная	со средней точкой	Одно-фазный мост	трех-фазный мост
Постоянная составляющая выпрямленного напряжения U^0	U_0	U_0	U_0	U_0	U_0
Действующее значение напряжения на фазе вторичной обмотки трансформатора U_2 . .	2,22 U_0	0,855 U_0	1,11 U_0	1,11 U_0	0,74 U_0 (треугольник) 0,43 U_0 (звезда)
Наибольшее (амплитудное) значение обратного напряжения, приложенное к вентилю, $U_{обр}$	3,14 U_0	2,1 U_0	3,14 U_0	1,57 U_0	1,05 U_0
Амплитуда переменной составляющей выпрямленного напряжения $U_{п}$ макс	1,57 U_0	0,25 U_0	0,67 U_0	0,67 U_0	0,06 U_0
Частота пульсации выпрямленного напряжения $f_п$ (*гц*) при частоте сети 50 *гц*	50	150	100	100	300
Действующее значение тока через вентиль $I_в$	1,57 I_0	0,59 I_0	0,785 I_0	0,785 I_0	0,59 I_0
Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора I_2	1,57 I_0	0,59 I_0	0,785 I_0	1,11 I_0	0,48 I_0 (треугольник) 0,835 I_0 (звезда)
Действующее значение тока первичной обмотки трансформатора без учета тока холостого хода I_1	1,21 $K_{тр} I_0$	0,49 $K_{тр} I_0$	1,11 $K_{тр} I_0$	1,11 I_0	$K_{тр} I_0$
Коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора K_2	0,29	0,66	0,57	0,81	0,94
Коэффициент использования первичной обмотки трансформатора K_1	0,37	0,8	0,81	0,81	0,94

Примечания 1. Коэффициент трансформации $K_{тр} = W_2/W_1$.

2 Соотношение токов и напряжений действительны при любой частоте питающего напряжения

3 Число фаз первичной обмотки трансформатора обозначено m_1.

4 Число фаз вторичной обмотки трансформатора обозначено m_2.

На основании данных табл. 13 можно сделать следующие выводы.

1. В мостовых схемах выпрямления наилучшие соотношение напряжений U_0/U_2 и использование трансформатора по току. Следовательно, стремясь уменьшить габариты и вес выпрямителя, в особенности при малой мощности и однофазном токе питания, надо применять эти схемы, если это позволяют выбранные вентили. Например, при выборе кенотронов нет смысла применять мостовые схемы выпрямления, в то же время при использовании полупроводниковых вентилей и на относительно небольшие напряжения при больших токах нагрузки необходимо использовать мостовые схемы.

2. Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения уменьшается, а частота пульсации увеличивается с увеличением числа фаз выпрямления $m = pq$, где p — число фазовых обмоток трансформатора, а q равно единице или двум, в зависимости от схемы выпрямления — однотактной или двухтактной. Отсюда следует общий принцип, что при высоких выпрямленных напряжениях, когда технически трудно осуществить сглаживание выпрямленного тока (требуются большие емкости при высоком рабочем напряжении), надо выбирать большое число фаз выпрямления, даже если это ведет к усложнению трансформатора и увеличению числа вентилей. Тем не менее при малой мощности выпрямителя предпочтительно выбирать однофазные схемы выпрямления.

Приведенные общие соображения остаются верными независимо от характера нагрузки. В частности, при использовании схемы выпрямителя с фильтрами, начинающимися с емкости, когда сказывается емкостная реакция фильтра на режим работы трансформатора и вентиля, эти рекомендации остаются справедливыми.

Если нагрузка выпрямителя имеет преимущественно индуктивный характер, то все сказанное выше остается в силе и с достаточной точностью можно пользоваться данными табл. 13 для расчета выпрямителя. Если выпрямитель работает в режиме емкостной реакции нагрузки, то отсечка тока меньше 90°, как это показано на диаграммах рис. 30. В этом случае расчет основных схем выпрямления производится в соответствии с данными табл. 14.

Расчетные коэффициенты, использованные в табл. 14 для расчета выпрямителя, определяются с помощью графиков, показанных на рис. 31. Исходная расчетная величина для определения коэффициентов B, F, D, H равна

$$A = \frac{3{,}14R}{mR_{\text{н}}},$$

где $R_{\text{н}} = U_0/I_0$ — сопротивление нагрузки; I_0 — ток нагрузки; U_0 — напряжение постоянного тока на нагрузке; $R = R_{\text{тр}} + R_{\text{в}}$ — сопротивление фазы выпрямителя; $R_{\text{тр}}$ — активное сопротивление обмоток трансформатора одной фазы; $R_{\text{в}}$ — сопротивление вентиля; m — число фаз выпрямления.

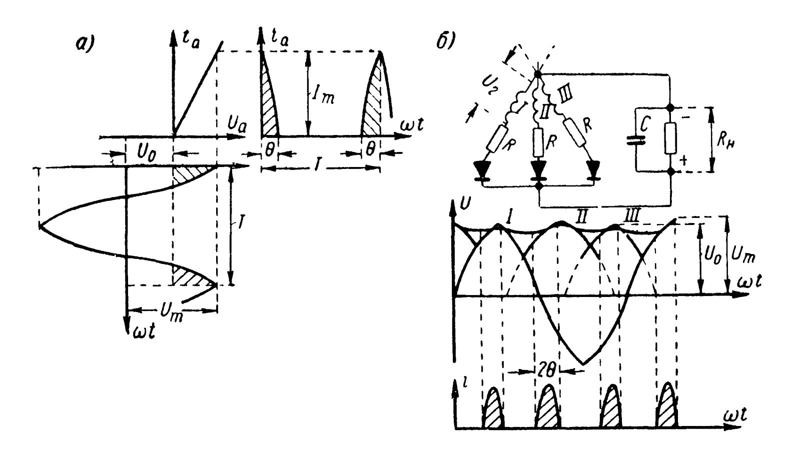


Рис. 30. Диаграмма режима работы однофазного выпрямителя с емкостной нагрузкой (*а*), схем *m*-фазного однотактного выпрямителя с емкостной нагрузкой и графики тока и напряжений в схеме (*б*).

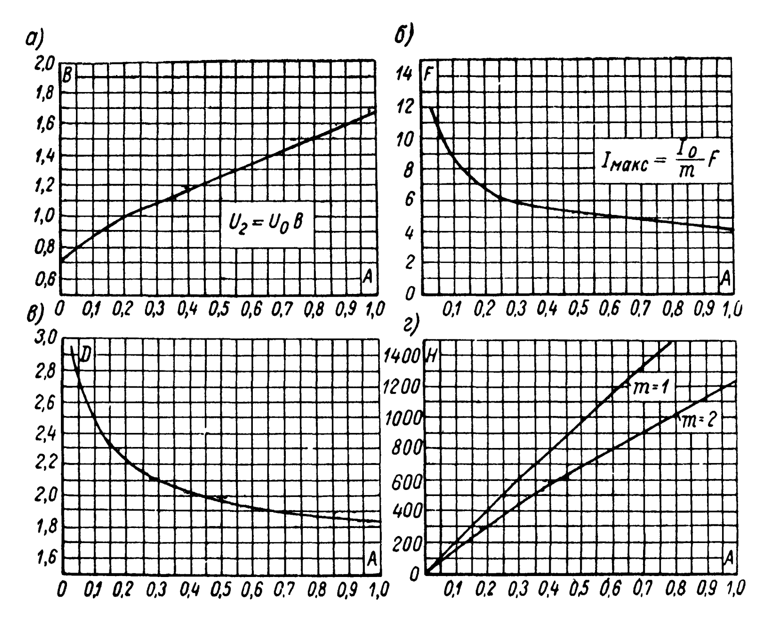


Рис. 31. Графики для определения расчетных коэффициентов.

Таблица 14

Определяемая величина и ее обозначение	Однофазные схемы выпрямления			
	однотактная	двухтактная со средней точкой	двухтактная мостовая	двухтактная с удвоением напряжения
Число фаз выпрямления m	1	2	2	1*
Значение коэффициента K (для $f_c = 50$ *гц*) . .	0,09	0,18	0.15	0,04
Действующее значение напряжения на фазе вторичной обмотки трансформатора U_2 . .	BU_0	BU_0	BU_0	$B\frac{U_0}{2}$
Амплитудное значение обратного напряжения на вентиле	2.85 U_2	2,85 U_2	1,42 U_2	2,85 U_2
Коэффициент трансформатора $K_{тр}$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$	$\frac{U_2}{U_1}$
Максимальный ток через вентиль $I_{макс}$	FI_0	$0,5\,FI_0$	$0,5\,FI_0$	FI_0
Ток вторичной обмотки трансформатора I_2 . .	DI_0	$0,5\,DI_0$	$0,71\,DI_0$	$1,41\,DI_0$
Ток первичной обмотки трансформатора (с учетом тока холостого хода) I_1	$1,2\,K_{тр}{*}\sqrt{I_2^2 - I_0}$	$1,7\,K_{тр}I_2$	$1,2\,K_{тр}I_2$	$1.2\,K_{тр}I_2$
Сопротивление фазы выпрямителя $R_в$	$R_i + R_{тр}$	$R_i + R_{тр}$	$2R_i + R_{тр}$	$R_i + R_{тр}$

* При расчете сглаживающего фильтра типа LC или RC значение m для этой схемы следует принимать равным 2.

Сопротивление вентиля $R_в$ определяется по характеристикам вентиля. При этом с достаточной точностью можно считать, что

$$R_в = \frac{\Delta U_в}{I_в},$$

где $\Delta U_в$ — падение напряжения на вентиле при протекании через него тока $I_в$.

Активное сопротивление трансформатора обычно точнее всего определяется после его изготовления. При этом можно измерить активные сопротивления первичной обмотки R_1 и вторичной фазовой обмотки R_2 и, зная коэффициент трансформации $K_{тр}$, рассчитать $R_{тр} = R_2 + K^2_{тр}R_1$.

Однако с успехом практикуется расчет величины $R_{тр}$ по заранее полученным формулам. Одной из таких формул является следующая.

$$R_{тр} = K \frac{U_0}{I_0 \sqrt[4]{I_0 U_0}},$$

где K — коэффициент, зависящий от схемы выпрямителя (см. табл. 14). Более точные формулы имеют сложный вид

Приведенные на рис. 31 графики $H = \varphi(A)$ используются для определения емкости конденсатора $C_ф$ простейшего сглаживающего фильтра при заданном коэффициенте пульсации

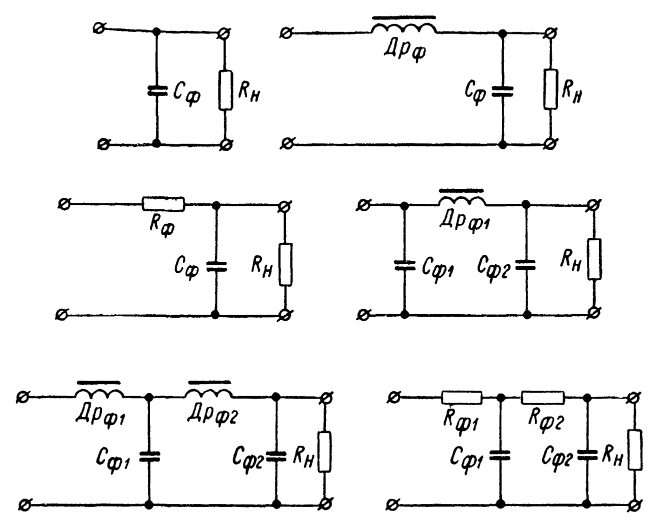


Рис. 32. Схемы сглаживающих фильтров.

$K_{п\ доп}$. При частоте выпрямляемого тока $f_c = 50$ *гц* емкость конденсатора фильтра определяется в виде

$$C_ф = \frac{H \cdot 10^6}{K_{п.доп} f_c R_н} \approx 3000 \frac{H}{K_{п.доп} R_н} \ [мкф]$$

Если частота выпрямленного тока выше 50 *гц*, то емкость конденсатора фильтра уменьшается в $C/50$ раз. При этом надо выбирать допустимый коэффициент пульсации выпрямленного напряжения на конденсаторе $C_ф$ в пределах $K_п = 0{,}05 \div 0{,}15$, имея в виду дальнейшее снижение пульсации за счет использования дополнительных звеньев фильтра.

Схемы простейших сглаживающих фильтров приведены на рис. 32. При этом коэффициент сглаживания Г-образного звена фильтра, составленного из сглаживающего дросселя $Др_ф$ и конденсатора $C_ф$, определяется в виде

$$K_{сг} = \frac{K_{п1}}{K_{п2}} = 40 m^2 f_п^2 L_ф C_ф,$$

где $L_ф$ — индуктивность сглаживающего дросселя. Если же используется Г-образный RC-фильтр, то коэффициент сглаживания

$$K_{сг} = 6{,}28 f_с m R_ф C_ф.$$

Если имеются несколько звеньев сглаживающих фильтров, то общий коэффициент сглаживания

$$K_{сг} = K_{сг1} K_{сг2} \ldots$$

Схемы выпрямления с умножением напряжения. Схемы выпрямления с умножением напряжения используются при относительно высоких напряжениях по сравнению с подводи-

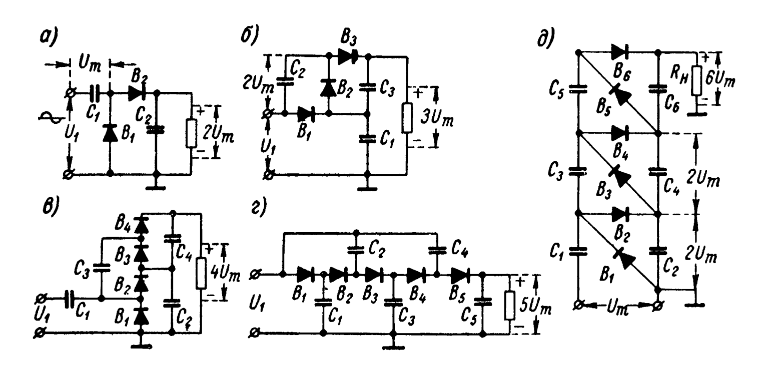


Рис. 33. Однофазные однотактные схемы выпрямления с умножением напряжения.

мым к ним напряжением и при малых токах нагрузки, поскольку они все являются схемами с емкостной реакцией и при больших токах нагрузки требуются конденсаторы большой емкости Все эти схемы можно классифицировать как однотактные (несимметричные) и двухтактные (симметричные). Те и другие могут быть трансформаторные и бестрансформаторные. Их также можно различать как однофазные и многофазные.

Однофазные однотактные (бестрансформаторные) схемы выпрямления с умножением напряжения показаны на рис. 33. Их действие широко известно. Например, действие схемы с удвоением напряжения (рис. 33, *а*) сводится к следующему. В первый полупериод выпрямленного тока, когда анод вентиля B_1 находится под положительным потенциалом, через него протекает ток, и конденсатор C_1 заряжается примерно до амплитудного напряжения U_m. В это время вентиль B_2 не проводит ток. Во второй полупериод вентиль B_1 не проводит ток, а вентиль B_2 ток проводит под воздействием суммарного напряжения сети и конденсатора C_1. В результате конденсатор C_2 зарядится до напряжения примерно $2U_m$. В последующий период процесс повторится.

Что касается режима работы конденсатора C_2, то при большом сопротивлении $R_н$ и постоянной времени $C_2R_н$, намного большей $T = 1/f_c$, конденсатор не успеет полностью разрядиться за период, а в следующий период он снова подзарядится. В результате напряжение на конденсаторе C_2, а следовательно, и на нагрузке, будет пульсировать в пределах от $U_{мин}$ до $U_{макс}$.

Для увеличения выпрямленного напряжения в 3 раза используется схема умножения, приведенная на рис. 33, *б*. В ней в первый полупериод выпрямляемого тока, когда анод вентиля B_1 положителен относительно катода, через него протекает ток и конденсатор C_1 заряжается примерно до U_m. Во второй полупериод выпрямляемого тока вентиль B_1 не проводит ток, а вентиль B_2 проводит и конденсатор C_2 заряжается до напряжения, примерно равного $2U_m$, как и в предыдущей схеме. В последующий полупериод вентиль B_1 снова проводит ток и конденсатор C_1 разряжается. Одновременно будет протекать ток через вентиль B_3 и окажется замкнутой цепь тока, включающая в себя конденсаторы C_2 и C_3, вентили B_{1-3}. В результате через некоторую часть периода конденсатор C_3 окажется заряженным от конденсатора C_2 до напряжения $2U_m$.

Сопротивление нагрузки $R_н$, подключенное к зажимам последовательно соединенных конденсаторов C_1 и C_3, окажется под суммарным напряжением $3U_m$. В связи с разрядом конденсаторов через сопротивление нагрузки на нем будет пульсирующее напряжение, меняющееся от $U_{макс}$ до $U_{мин}$. Точно так же можно проследить за действием остальных схем, осуществляющих умножение выпрямленного напряжения в K раз. Можно показать, что при умножении напряжения в K раз (приближенно) требуется K каскадов умножения, в каждом из которых имеется вентиль и конденсатор, т. е. $K = n$, где n — число конденсаторов и вентилей выпрямителя. Также очевидно, что установившийся режим работы схемы выпрямления с умножением наступает спустя 0,5 KT, где T — период выпрямляемого тока. Учет времени установления имеет особую важность для маломощных выпрямителей при импульсном характере нагрузки. Например, фотоэлектрическая лампа-вспышка не может включаться к выпрямителю сразу же после его подключения в сеть — требуется выдержать некоторое время, пока установится напряжение на конденсаторах последнего каскада умножения. Если в схемах с небольшой кратностью умножения эта выдержка времени мала, то в выпрямителях с большой кратностью (например, в 100 раз) выдержка времени существенно заметна.

В рассматриваемых однотактных схемах выпрямления с умножением напряжения, независимо от кратности умножения, частота пульсаций равна частоте сети, поскольку подзарядка выходных конденсаторов происходит только раз за период. Это особенно наглядно видно на примере схемы с удвоением напряжения, где C_2 подзаряжается каждый период.

На первый взгляд кажется, что кратность умножения ограничивается потерями в схеме, емкостью конденсаторов

и частотой выпрямляемого тока. Можно показать, что для схем рис. 33 следует выбирать

$$K \leqslant \sqrt{\frac{U_m f_c C}{I_0}},$$

где U_m — амплитуда напряжения на входе выпрямителя; f_c — частота выпрямляемого тока; C — емкость конденсатора в каждом каскаде умножения; I_0 — ток нагрузки.

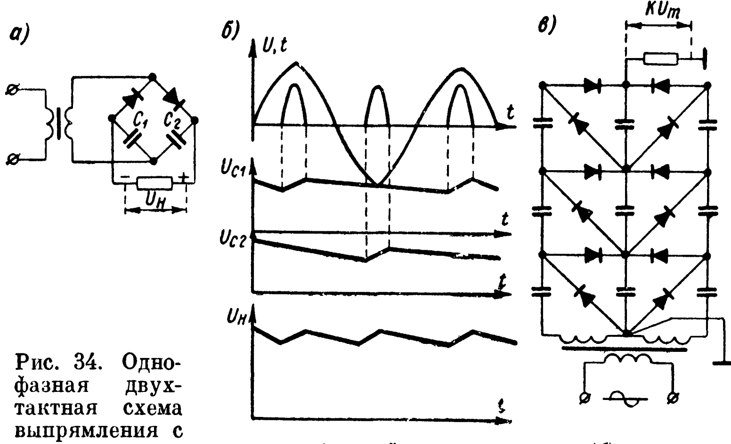


Рис. 34. Однофазная двухтактная схема выпрямления с умножением напряжения (*а*), график напряжения (*б*) и многокаскадная схема (*в*).

Пульсация напряжения на нагрузке

$$K_п = \frac{\Delta U_0}{U_0} = \frac{I_0}{f_c C U_0} \cdot \frac{K(K+1)}{2},$$

т. е. также зависит от кратности умножения. Разумеется, что такие схемы практически можно применять при маленьких токах нагрузки.

Трансформаторные схемы выпрямления с умножением показаны на рис. 34. Первая из них обеспечивает удвоение напряжения. Эти схемы обладают почти всеми преимуществами двухтактных схем выпрямления, и поэтому их использование предпочтительнее, чем схемы рис. 33.

Некоторые разновидности схем выпрямления. Все проведенные выше схемы выпрямления можно считать основными, наряду с которыми возможен ряд различных вариантов. Некоторые из таких вариантов описаны ниже.

Варианты мостовых схем выпрямления приведены на рис. 35. Простейшая из этих схем (рис. 35, *а*) может рассматриваться как комбинация двух независимых мостовых схем, питающихся от одного трансформатора с общей первичной обмоткой. Здесь, в зависимости от надобности, можно получить три разных выпрямленных напряжения: U_0, U_{01} и U_{02}.

На рис. 35, *б* показана схема выпрямления, в которой также можно получить три разных напряжения. В отличие от схемы рис. 35, *а* здесь комбинируются две двухтактные схемы со средней точкой вторичной обмотки трансформатора. Как и в первой схеме, U_{01} и U_{02} — напряжения на выходе каждого из выпрямителей, а $U_0 = U_{01} + U_{02}$, т. е. имеем последовательное соединение выпрямленных напряжений.

На рис. 35, *в* показана комбинация схем мостовой и двухтактной со средней точкой, причем средняя точка вторичной обмотки трансформатора не выведена. В этой схеме можно

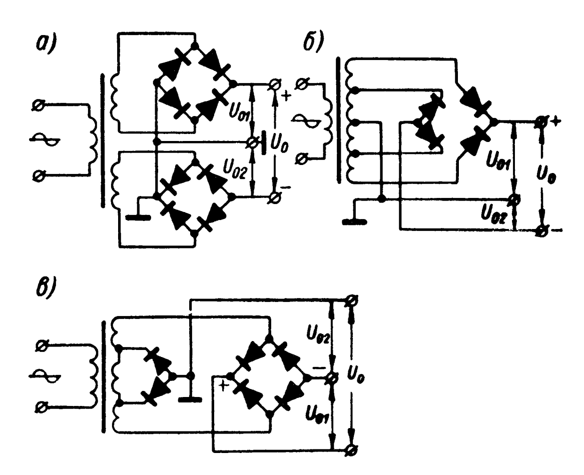


Рис. 35. Варианты выпрямительных схем: *а* — двух мостов; *б* — разомкнутого моста; *в* — моста и двухтактной схемы.

получить сумму и разность выпрямленных напряжений; если поменять полярность включения диодов во второй половине схемы, оставляя неизменной мостовую схему выпрямления, то можно получить вместо разности напряжений их сумму.

Схемы выпрямления с преобразованием числа фаз выпрямляемого тока известны давно и применяются широко в самых разнообразных устройствах электрического питания. Примером простейшего преобразования числа фаз выпрямления является двухтактная однофазная схема выпрямления со средней точкой вторичной обмотки трансформатора, что дает основание называть эту схему двухфазной схемой выпрямления. Не менее широко известны трансформаторы, у которых первичная обмотка трехфазного тока, а вторичные обмотки образуют систему шести или двенадцатифазного тока. Также известны схемы включения трансформаторов для получения двух выпрямительных схем со средними точками или четырехфазных выпрямителей при использовании сети трехфазного тока, преобразование трехфазного тока в двухфазный и различные

варианты этих схем. Все эти схемы являются вариантами схем Скотта.

Схема преобразования трехфазного тока в двухфазный и наоборот при помощи двух однофазных трансформаторов показана рис. 36, *а*. Один конец первичной обмотки второго трансформатора соединяется со средней точкой первичной обмотки первого трансформатора, и получающиеся три конца подключаются к трехфазной сети *ABC*. При таком соединении напряжение на зажимах трансформатора Tp_1 равно линейному напряжению сети U_1, а напряжение на первичной обмотке Tp_2

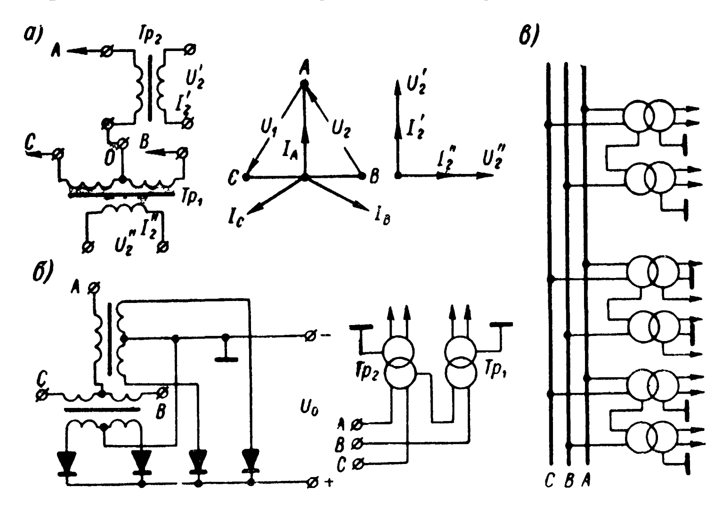


Рис. 36. Схемы преобразования трехфазного тока: *а* — в двухфазный; *б* — в восьмифазный; *в* — графическое изображение восьмифазной схемы.

будет 0,86 U_1 (высота треугольника на рис. 36, *а*) и сдвинуто по отношению к первичному напряжению Tp_1 на 90°. Правильным выбором коэффициентов трансформации и нагрузки во вторичных цепях трансформаторов можно добиться одинаковой загрузки первичных обмоток и забираемого из сети тока $I_A = I_B = I_C$.

На рис. 36, *б* показана та же схема, но вторичные обмотки трансформаторов выполнены со средними точками, что дает возможность осуществить «четырехфазное» выпрямление тока.

На рис. 36, *в* показано дальнейшее развитие этой схемы в «восьмифазную» схему питания, обычно применяемую для электропитания цепей накала мощных электронных ламп.

В некоторых новейших образцах зарубежных телевизоров применяется однотактная схема выпрямления тока для питания накала всех ламп, соединенных последовательно. До этого широко применялись гасящие сопротивления и термистор, ограничивающий бросок тока в момент включения телевизора,

когда нити накаливания ламп не нагреты и обладают малым сопротивлением. Таким образом, новшество предусматривает исключение гасящего сопротивления и термистора, а взамен их используется кремниевый диод. В результате вместо питания переменным током цепи накала нагреваются пульсирующим током синусоидальной формы, так как в схеме нет сглаживающего фильтра.

Описанная схема питания цепей накала в телевизоре приводит к экономии около 20 *вт* мощности.

11. УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Общие сведения

Управляемым выпрямителем называется такой, в котором изменением режима его работы можно регулировать напряжение на нагрузке при неизменном входном напряжении переменного тока. Такие выпрямители могут быть построены по одной из общепринятых схем выпрямления (однофазной и многофазной, однотактной и двухтактной). Обычно для питания маломощных радиотехнических устройств используются однофазные и двухфазные схемы однотактных управляемых выпрямителей.

Способ управления (регулирования) выпрямленного напряжения на нагрузке зависит от типа вентиля: в ионных и полупроводниковых вентилях изменяется момент начала пропускания тока (отпирания), в электронных же вентилях регулируется сопротивление вентиля выпрямляемому току.

Блок-схема управляемого выпрямителя показана на рис. 37, *а*. Здесь силовой трансформатор *1* обеспечивает питание схемы с напряжением $U_2 = U_0/K$, где U_0 — выпрямленное напряжение на нагрузке, а K — коэффициент, зависящий от схемы выпрямления. Величину напряжения U_0 можно затем уменьшить, воздействуя на вентиль *2* управляющим напряжением $U_у$, вырабатываемым в блоке *3*. Фильтр *4* служит для сглаживания пульсации выпрямленного напряжения. Так как величина напряжения U_0 регулируется, то в схеме отсутствуют стабилизаторы напряжения как со стороны входа, так и на выходе выпрямителя.

Виды выпрямителей

Тиратронные. Простейшая однотактная однофазная схема управляемого выпрямителя с тиратроном показана на рис. 37, *б*. Здесь с помощью фазорегулирующего устройства Φ сеточное напряжение E_g сдвигается относительно анодного на угол регулирования α. Когда $\alpha = 0$, т. е. анодное и сеточное напряжения совпадают по фазе, тиратрон зажигается каждый период выпрямляемого напряжения и горит в течение полупериода, как показано на графиках рис. 37, *в*. Если же сеточное напряжение сдвинуто относительно анодного по фазе на угол α, то зажигание тиратрона задерживается до тех пор,

пока положительное напряжение на аноде не достигнет вполне определенного значения, и ток через тиратрон протекает в течение времени меньшего, чем $T/2$, как это показано на графике рис. 37, *г*. В результате ток через нагрузку уменьшится и напряжение на нагрузке снизится. Таким образом, выпрямленное напряжение на нагрузке будет зависеть от сдвига фаз между сеточным и анодным напряжениями, т. е выпрямитель будет управляемым. Можно показать, что относительное выходное напряжение выпрямителя $U_0\alpha/U_0$ зависит от угла

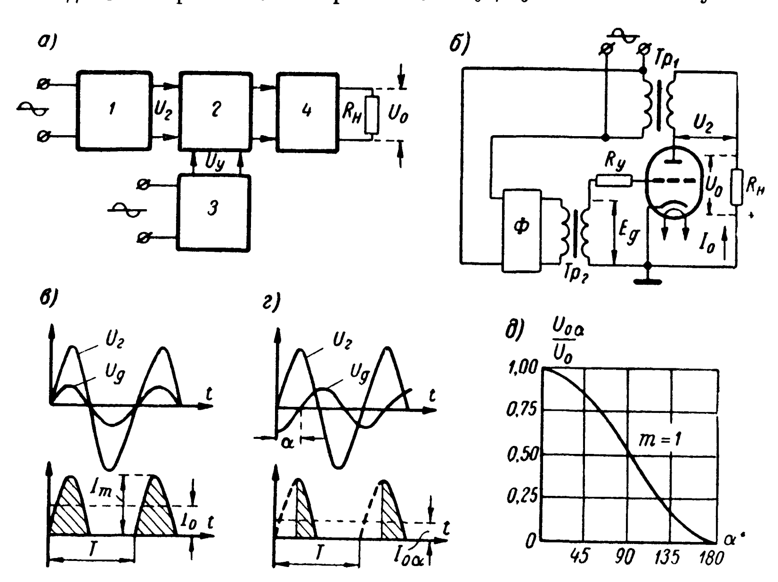


Рис. 37. Управляемый выпрямитель: *а* — блок-схема; *б* — схема однофазного выпрямителя; *в* — графики тока и напряжений при $\alpha = 0$; *г* — то же при $\alpha = T/4$; *д* — регулировочная кривая

сдвига фазы α, как показано на регулировочной характеристике рис. 37, *д*. При этом регулируемое напряжение

$$U_{0\alpha} = U_0 \frac{1 + \cos\alpha}{2},$$

где U_0 выпрямленное неуправляемое напряжение.

Аналогичное действие управляемых тиратронных выпрямителей можно показать и в случае использования других схем выпрямления. Однако, поскольку тиратронные выпрямители в маломощных выпрямителях сейчас почти не применяются, ограничимся только перечислением их свойств.

1) выпрямители могут быть созданы достаточно мощными, но со сложными и громоздкими схемами управления и с недостаточно приемлемыми эксплуатационными характеристиками, присущими ионным вентилям;

2) нельзя применять многофазные схемы выпрямления с широкими пределами регулирования, причем форма кривой выпрямленного напряжения резко ухудшается, что вызывает заметное усложнение сглаживающих фильтров.

Эти особенности тиратронных управляемых выпрямителей привели к тому, что в настоящее время находят применение электронные и полупроводниковые управляемые выпрямители, а тиратронные почти вытеснены ими и будут все больше вытесняться по мере развития и совершенствования управляемых полупроводниковых вентилей.

С электронными вентилями. В управляемых выпрямителях с электронными вентилями регулирование тока в нагрузке достигается за счет изменения сопротивления вентиля при

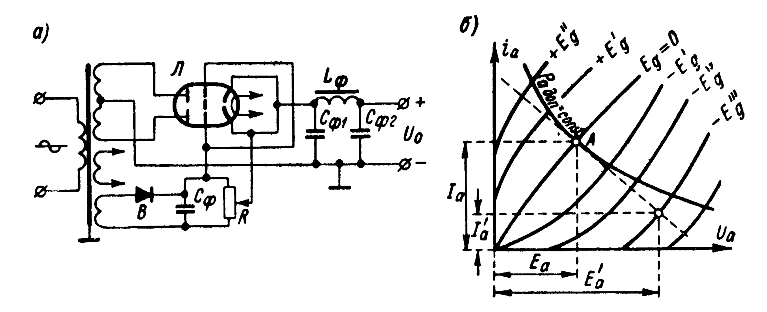


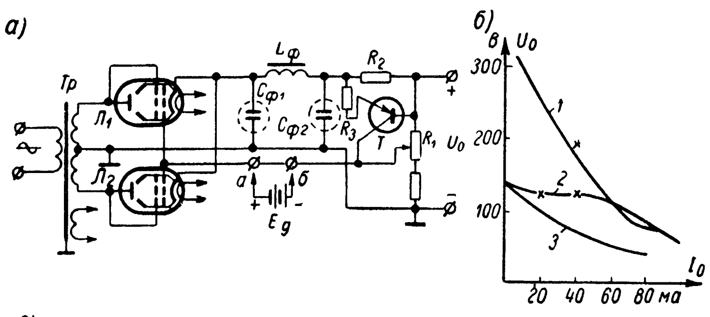
Рис. 38. Однофазный двухтактный управляемый выпрямитель с электронным вентилем: *а* — схема выпрямления; *б* — семейство статических характеристик одного из триодов.

изменении потенциала управляющей сетки лампы, а не изменением времени протекания тока через вентиль, как это имеет место в тиратронных выпрямителях. Отсюда практически вытекают особенности таких выпрямителей, сводящиеся к тому, что они не могут быть мощными, обладают малыми к. п. д. и могут быть построены с применением трехэлектродных и многоэлектродных ламп. Очевидно также существенное отличие электронных управляемых выпрямителей от тиратронных в том, что в них сочетаются функции выпрямления и управления в одном приборе — электронной лампе.

На рис. 38, *а* показана схема однофазного двухтактного управляемого выпрямителя. В качестве управляющего напряжения $U_у$, подаваемого на управляющие сетки триодов *Л*, используется выпрямленное напряжение, получаемое от вспомогательного выпрямителя с вентилем *В*. Величина управляющего напряжения регулируется при помощи переменного сопротивления *R*.

Как видно из рис. 38, *б*, где приведено семейство статических характеристик триода, изменение потенциала сетки приводит к изменению падения напряжения E_a на вентиле, что равнозначно изменению сопротивления вентиля протекающему по нему току. На рис. 38, *б* показано, что изменение

напряжения сетка-катод лампы от $E_g = 0$ до $E_g = -E'''_g$ приводит к регулированию тока от I_a до II_a', а следовательно, и к изменению выпрямленного напряжения от $U_0 = I_a R_н$ до $U'_0 = I_a R_н$. Разумеется, что надо выбирать электронные лампы с малыми внутренними сопротивлениями и большой крутизной управления (крутизной характеристики) по току. Этим требованиям удовлетворяют не только триоды с большой крутизной характеристики, но и электроннолучевые тетроды.



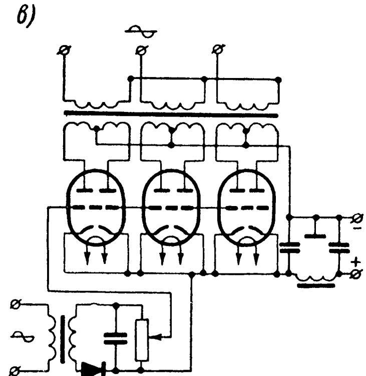


Рис. 39. Многофазные управляемые выпрямители: *а* — двухфазная с регулирующим транзистором; *б* — нагрузочные характеристики; *в* — шестифазный выпрямитель.

На рис. 39, *а* показана схема управляемого выпрямителя, в котором регулирование выходного напряжения осуществляется при помощи транзистора *T*. Здесь, меняя напряжение коллектор — база при помощи переменного сопротивления R_1, можно регулировать ток эмиттера транзистора и падение напряжения на сопротивлении R_2. При этом транзистор играет роль стабилизатора напряжения на выходе выпрямителя, о чем можно судить по нагрузочным характеристикам *1* (рис. 39, *б*) при отсутствии стабилизатора и *3* — при его наличии. Характеристика *2* более пологая, чем остальные характеристики, она получается при включении в схему (точки *а* — *б*) напряжения $E_g = 14 \div 16$ *в*.

На рис. 39, *в* показана схема управляемого многофазного выпрямителя, в котором значительно облегчены условия сгла-

живания пульсаций, поскольку частота пульсации повышается с увеличением числа фаз выпрямления. Такая схема имеет преимущество перед другими в случае достаточно большого тока нагрузки, когда возникают трудности изготовления сглаживающего фильтра.

С полупроводниковыми вентилями. *Управляемые вентили.* Современные управляемые полупроводниковые выпрямители строятся на основе использования свойств кремниевых управляемых вентилей (КУВ). Так как у этих вентилей вольт-амперная характеристика прямого тока очень похожа на характеристику тиратрона, то подобные приборы четырехслой-

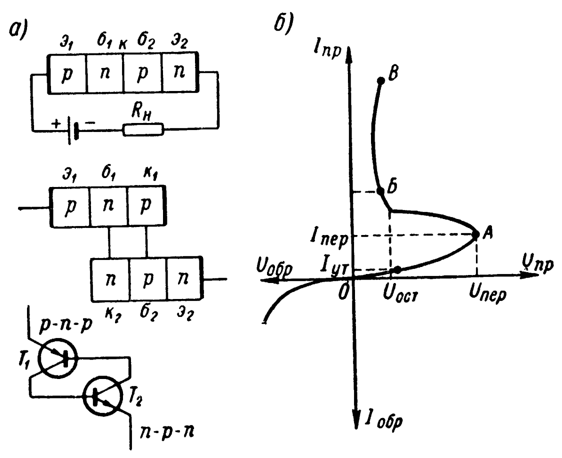


Рис. 40. Схематическое устройство управляемых диодов (*а*) и их вольт-амперная характеристика (*б*).

ной структуры называют приборами «тиратронного» действия. Имеются различные варианты этих приборов, отличающиеся числом электродов и назначением. Во всех этих приборах характеристика обратного тока почти не отличается от характеристик других полупроводниковых диодов.

В отличие от переключающего неуправляемого диода четырехслойной структуры, схематически показанного на рис. 40, *а*, в котором имеются только два электрода, существуют уже освоенные промышленностью многоэлектродные управляемые приборы подобного типа.

При указанной на рис. 40, *а* полярности включения источника питания оба эмиттерных перехода $э_1$ — $б_1$ и $э_2$ — $б_2$ будут отперты, а общий коллекторный переход *К* заперт. При этом через прибор течет небольшой ток, определяемый в основном обратным током $I_{к\ о}$ коллекторного перехода. Такое состояние диода соответствует положению «выключено». Этому состоянию соответствует участок *ОА* вольт-амперной характеристики, показанной на рис. 40, *б*. В этом состоянии через прибор

протекает ток $I_{\text{ут}}$, величина которого указывается для определенного напряжения питания. Вблизи точки A вольт-амперной характеристики при небольшом увеличении напряжения ток через диод резко возрастает, а сопротивление переменному току (дифференциальное сопротивление) становится равным нулю. Ток и напряжение $I_{\text{пер}}$ и $U_{\text{пер}}$ соответствуют режиму переключения диода.

На участке *АБ* характеристики сопротивление переменному току отрицательное, и рабочая точка перемещается на участок характеристики *БВ*, соответствующей включенному состоянию диода. За точкой *Б* внутреннее сопротивление диода переменному току снова положительное, падение напряжения

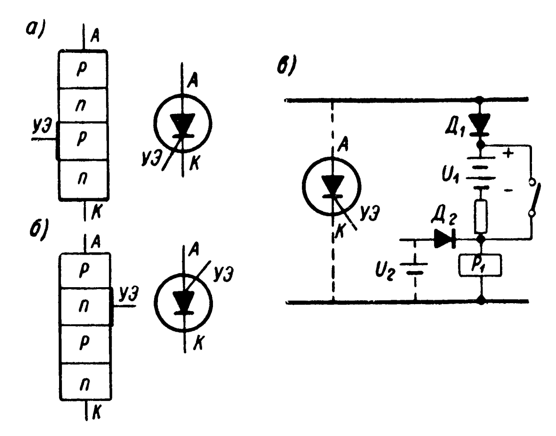


Рис. 41. Структура КУВ (*а*, *б*) и схема, имитирующая действие КУВ (*в*).

на диоде мало и определяется величиной $U_{\text{ост}}$, измеряемой при заданном значении тока.

Чтобы поддерживать диод во включенном состоянии, через него должен протекать ток не менее тока выключения $I_{\text{выкл}}$.

Приборы описанного типа часто называют динисторами. К ним относятся диоды отечественного производства типов Д227А — Д227И и Д228А — Д228И, для которых рабочая температура от —60 до +100° С, максимально допустимый постоянный ток 200—50 *ма*, максимально допустимый ток в импульсе при длительности импульса 10 *мксек* 10—2 *а*, максимальное обратное напряжение 10 *в* (верхние пределы относятся к Д227).

Кремниевые управляемые вентили (КУВ) отличаются от переключающих диодов наличием третьего управляющего электрода. Структура КУВ показана схематически на рис. 41, *а* и *б*. В зависимости от того, от какого слоя полупроводника сделан вывод управляющего электрода УЭ, требуется та или иная полярность управляющего напряжения. У КУВ управляющий электрод УЭ играет такую же роль, как

управляющая сетка в тиратроне, т. е. можно отпирать вентиль подобно тому, как осуществляется «зажигание» тиратрона, сравнительно малыми напряжениями и при затрате малой мощности. Такие вентили часто называют тиристорами.

Пояснение принципа действия КУВ удобно производить с помощью условной схемы рис. 41, *в*. Диод $Д_1$, батарея $Б_1$ и реле P_1 имитируют запертый КУВ, ток через который сможет проходить лишь в том случае, если он совпадает с пропускным направлением диода $Д_1$ и напряжение, приложенное к КУВ, больше U_1. Если эти условия соблюдены, то реле P_1 сработает, контакты реле замкнут цепь батареи $Б_1$ и величина тока, проходящего через управляемый ток, будет зависеть от параметров внешней цепи (сопротивления нагрузки и приложенного напряжения). Протекание тока через схему КУВ будет длиться до тех пор, пока он не станет меньше тока, необходимого для срабатывания реле P_1.

Действие управляющего электрода сводится к тому, что при подключении в схему рис. 41, *в* источника постоянного напряжения U_2, достаточный для срабатывания реле P_1, ток во внешней цепи КУВ не будет зависеть от величины приложенного извне напряжения. Затем ток через КУВ протекать будет даже при отключении батареи $Б_2$, так как реле срабатывает уже за счет протекания тока через КУВ и внешнюю цепь. Этим определяется сходство действия УЭ с управляющей сеткой тиратрона.

Отечественной промышленностью изготовляются управляемые кремниевые вентили типа Д235 — Д235Г, Д238А — Д238Е, схематическое устройство и габаритные размеры которых показаны на рис. 42. Для диодов Д238 максимально допустимая мощность рассеяния диода при температуре корпуса +40° С менее 20 *вт*, максимально допустимый средний ток 10 *а*, максимальный ток управления 0,35 *а* и максимальная рабочая температура +100° С.

Наряду с описанными четырехслойными диодами производятся также и другие типы управляемых приборов. К ним относятся бинисторы, тригисторы и фотраны. Бинисторы по своим характеристикам напоминают кремниевые управляемые переключатели, и их рассматривают часто как транзисторы с дополнительным управляющим электродом. Они применяются в основном в цепях сигналов с небольшим уровнем. Тригисторы также применяются в цепях переключения сигналов малого уровня. Фотраны отличаются тем, что цепь управляющего электрода может срабатывать под воздействием импульса света. Благодаря этому фотраны используются в фотоэлектронных установках.

Отечественной промышленностью производятся в широком ассортименте мощные управляемые кремниевые вентили с принудительным воздушным и водяным охлаждением серий ВКУ и ВКУВ со средними выпрямленными токами до 100 *а* при обратном напряжении до 300 *в*. Естественно, что такие вентили имеют специальное применение, не связанное с радиолюбительской практикой, и поэтому их описание опущено.

Выпрямители. Учитывая, что кремниевые управляемые вентили по своему действию аналогичны тиратронам, все

Рис. 42. Схематическое устройство и габаритные размеры управляемых кремниевых вентилей: *а* — типа Д235; *б* — типа Д238.

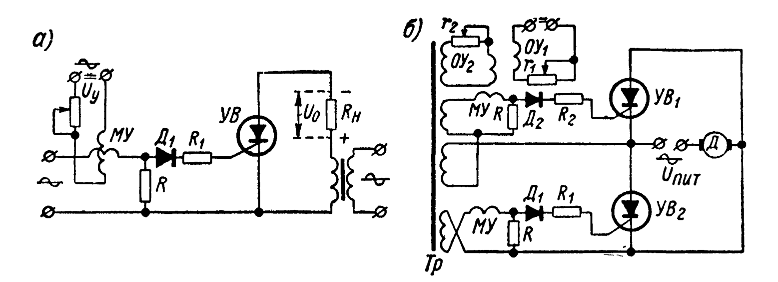


Рис. 43. Схемы управляемых выпрямителей: *а* — однофазная однотактная; *б* — двухтактная для питания двигателя постоянного тока.

разнообразие тиратронных схем выпрямления может быть применено к кремниевым вентилям. К ним вполне применимы также методы получения управляющих импульсных напряжений и методы расчета схем.

На рис. 43, *а* показана схема однотактного однофазного управляемого выпрямителя. Основная цепь выпрямления тока, включающая силовой трансформатор, сопротивление нагрузки и управляемый вентиль не представляют ничего нового относительно других подобных простейших выпрямителей. Управляющая цепь выпрямителя содержит источник переменного тока, магнитный усилитель и вспомогательный маломощный выпрямитель с диодом $Д_1$. Использование магнитного усилителя МУ дает возможность уменьшить расход мощности в цепи управления с напряжением $U_у$, причем управление может быть осуществлено либо на постоянном, либо на переменном токе.

Показанная на рис. 43, *б* схема управления реверсивным двигателем постоянного тока питается от управляемого двухтактного выпрямителя, причем управление вентиля осуществляется через магнитный усилитель МУ. Регулирование угла отпирания вентилей до 160° выполняется с помощью потенциометра r_1 в цепи обмотки управления $ОУ_1$ магнитного усилителя. Напряжение сигнала на включение двигателя *Д* и его реверс подаются на обмотку управления $ОУ_1$ от источника постоянного тока. Полное питание всей системы, в том числе цепи выпрямления с трансформатором *Тр*, осуществляется от источника тока частотой 400 *гц*.

12. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Общие сведения

Преобразователи постоянного тока часто называют в ы п р я м и т е л я м и с п р о м е ж у т о ч н ы м п р е о б р а з о в а н и е м выпрямляемого тока по частоте. Часто также используют такие преобразователи для получения постоянного

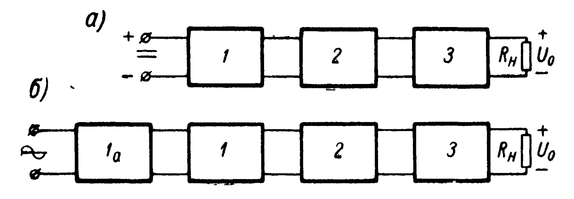


Рис. 44. Блок-схемы преобразователей: *а* — постоянного тока в переменный; *б* — переменного тока в постоянный.

тока высокого напряжения при наличии первичных источников переменного тока низкого напряжения. Блок-схемы подобных преобразователей приведен на рис. 44. Здесь блок *1* — промежуточный преобразователь тока по частоте, *2* — выпря-

митель, *3* — сглаживающий фильтр. Различие блок-схем рис. 44 заключается в наличии дополнительных элементов схем, например блока *1 а,* преобразующего переменный ток в постоянный, необходимый для питания промежуточного преобразователя тока. На рис. 44 не показаны такие блоки, как стабилизатор напряжения на выходе преобразователя.

Усложнение схемы за счет применения промежуточного преобразователя тока по частоте оправдывается следующим:

1) преобразование постоянного тока низкого напряжения в более высокое почти невозможно без применения промежуточного преобразователя;

2) применение промежуточного преобразователя тока позволяет выбрать достаточно высокую частоту выпрямляемого тока и упростить сглаживающий фильтр;

3) при исходном питании преобразователя от источника переменного тока заметно упрощается силовой трансформатор;

4) наличие промежуточного преобразователя тока позволяет применить токи импульсного характера, что весьма важно для маломощных выпрямителей с высокими выходными напряжениями.

Отмеченные преимущества описываемых преобразователей тока привели к их широкому распространению. В них используются в качестве промежуточных преобразователей различные генераторы, в том числе генераторы тока синусоидальной формы низкой и высокой частоты, блокинг-генераторы, мультивибраторы, накопители энергии с зарядной индуктивностью и другие. Во всех этих промежуточных преобразователях, в зависимости от напряжения исходного источника питания, используются электронные лампы или полупроводниковые приборы. Например, если нужно обеспечить выходное напряжение в 15—100 *кв* при первичном напряжении постоянного тока 200—400 *в,* то используют электронные лампы; при выходном напряжении 100—500 *в* и входном напряжении 2—24 *в* применяют полупроводниковые приборы.

Схемы промежуточных преобразователей могут быть разными, в том числе однотактными и двухтактными, с независимым возбуждением и самовозбуждением. Точно так же могут быть использованы различные схемы выпрямления. Часто применяются схемы выпрямления с многократным умножением выпрямленного напряжения.

В качестве иллюстрации на рис. 45 приведены схемы преобразователей тока с электронными лампами. В преобразователях, приведенных на рис. 45, *а,* лампы используются в схемах генераторов звуковой частоты.

На рис. 45, *б* показана схема преобразователя с непосредственным питанием от сети переменного тока. Здесь дополнительный П-образный сглаживающий фильтр может явиться своеобразным накопителем энергии, если правильно выбрать емкости конденсаторов фильтра.

На рис. 45, *в* показано несколько вариантов преобразователей с промежуточными преобразователями в виде высокочастотных генераторов тока синусоидальной формы

На рис 45, *г* показана схема преобразователя, в котором промежуточным преобразователем служит лампа $Л_2$ с заряд-

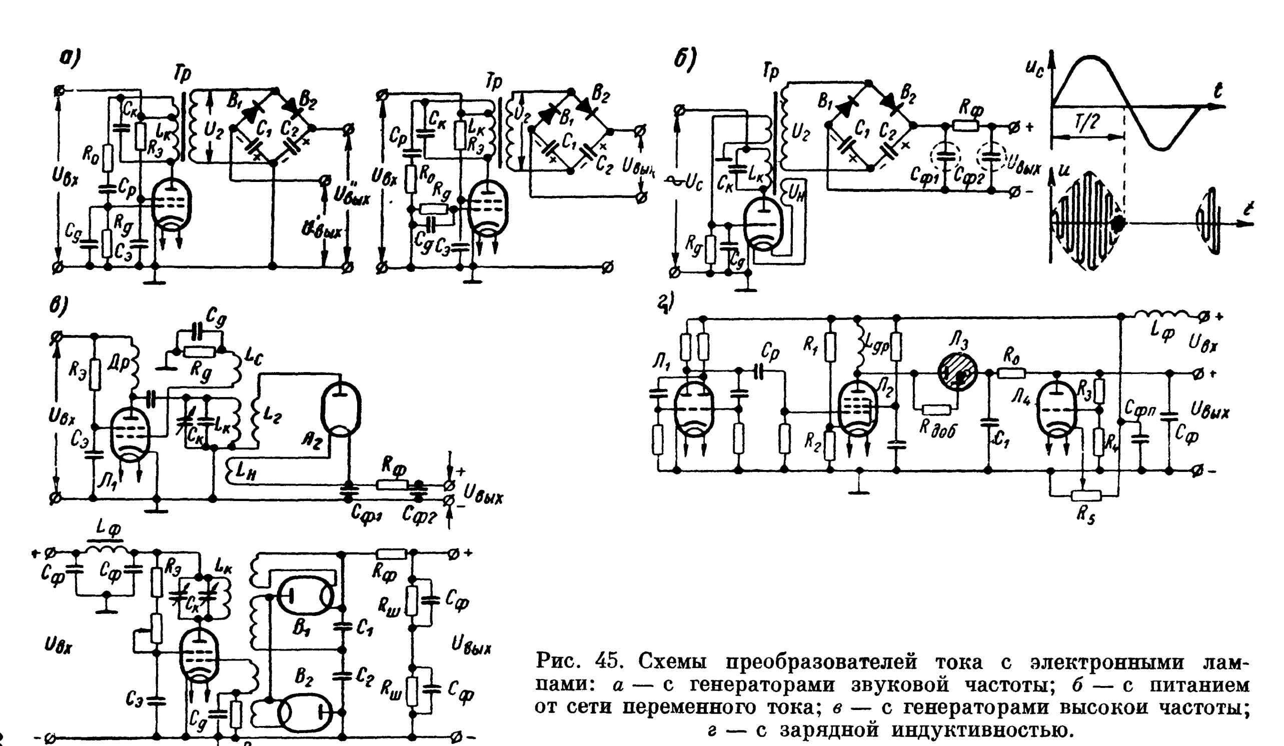


Рис. 45. Схемы преобразователей тока с электронными лампами: *а* — с генераторами звуковой частоты; *б* — с питанием от сети переменного тока; *в* — с генераторами высокой частоты; *г* — с зарядной индуктивностью.

ной индуктивностью $L_{др}$, причем управление процессами заряда и разряда индуктивности осуществляется с помощью мультивибратора на лампе $Л_1$. В качестве выпрямителя используется газоразрядная лампа $Л_3$ в режиме тлеющего разряда (с ненакаливаемым катодом); в качестве электрон-

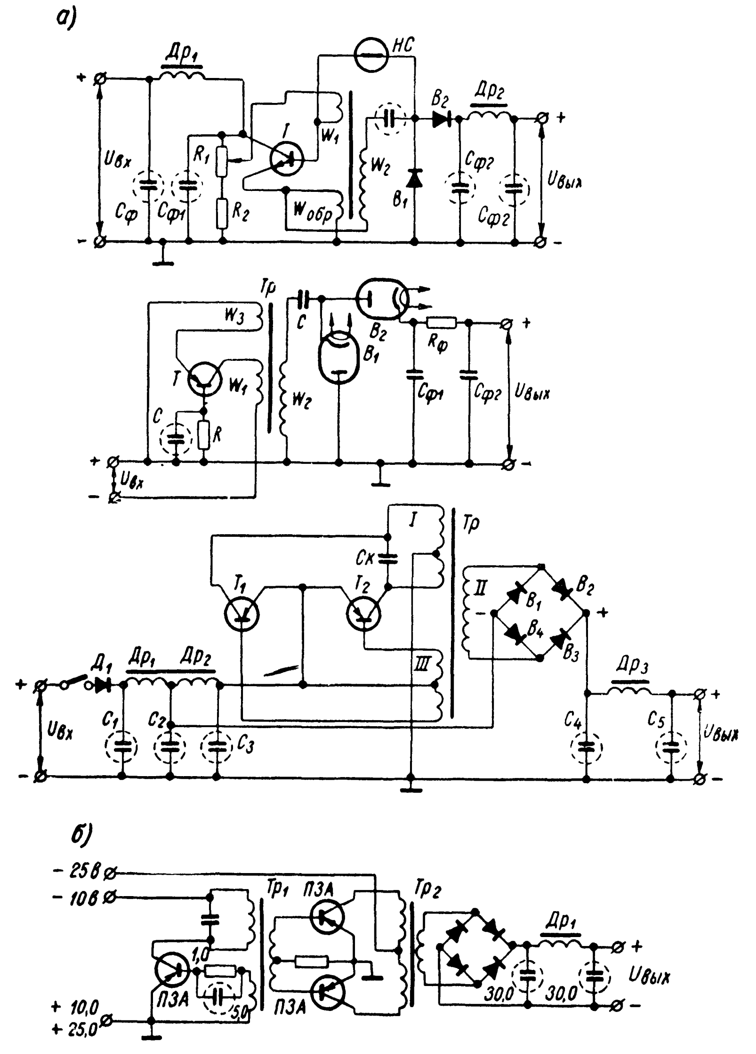


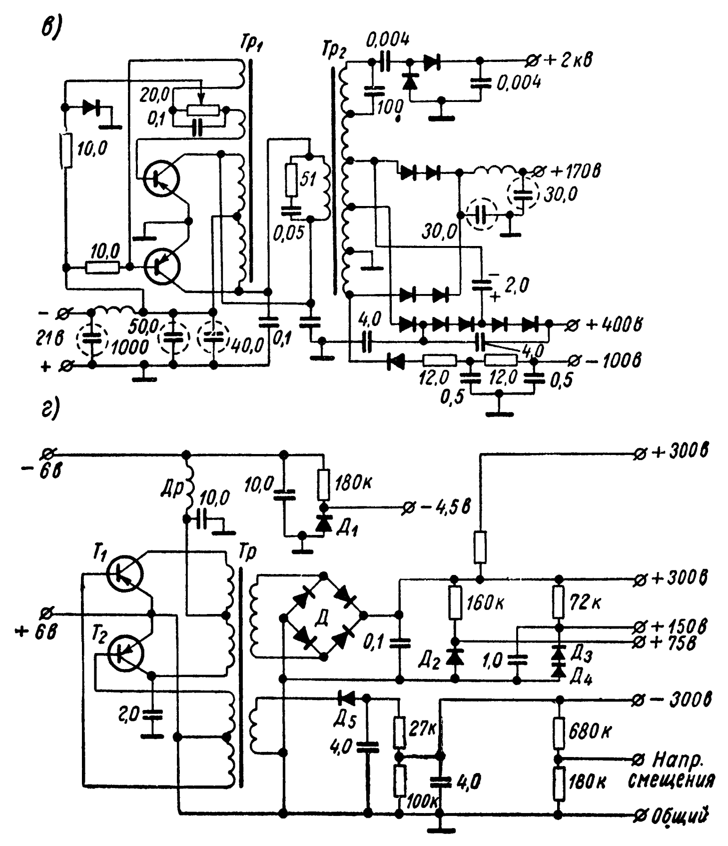
Рис 46. Схемы преобразователей с полупроводниковыми прибо частоты; *б* — с двухкаскадным генератором; *в*, *г* — комбини

ного стабилизатора выходного напряжения использована схема с лампой $Л_4$. Приведенная схема обычно используется при выходном напряжении до 5000 *в* и малых токах нагрузки для питания радиоэлектронных устройств, устанавливаемых на шарах-пилотах, запускаемых с исследовательскими целями в стратосферу.

На рис. 46 приведены схемы преобразователей с полупроводниковыми приборами.

13. ЗАЩИТА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Как известно, за счет переходных процессов, происходящих при включении и выключении источников питания, происходят заметные увеличения тока в цепях вентилей и резкое повышение напряжения на элементах сглаживающего фильтра.



рами: *а* — с однотактными и двухтактными генераторами звуковой
рованные источники тока с различными напряжениями.

Эти явления известны давно, и в выпрямителях приняты соответствующие меры защиты. Например, резкое повышение тока в вентилях, а следовательно, и в обмотках трансформатора, приводит к перегоранию плавкого предохранителя, обычно включаемого в цепь первичной обмотки трансформатора. Если такой предохранитель поставлен со значительным превышением допустимого тока, то он долгое время не перегорает даже при заметно больших перегрузках по току, и в результате происходят повреждения обмоток дросселя сглаживающего фильтра или силового трансформатора. В мощных устройствах ограничение тока при включении в сеть обеспечивается также ступенчатым повышением входного напряжения или включением пусковых сопротивлений в первичную цепь силового трансформатора. Точно так же принимаются меры защиты от перенапряжений. В частности, рабочее напряжение конденсаторов сглаживающих фильтров выбирается почти с удвоенным запасом. Более того, в мощных установках в цепях конденсаторов включаются предохранители.

Указанные меры защиты, так называемые пассивные способы защиты, неэффективны в применении к полупроводниковым выпрямителям, сглаживающим фильтрам, преобразователям и стабилизаторам. Приборы этих устройств быстро повреждаются при перегрузках по току и напряжению. Этим объясняется стремление применять более действенные активные меры защиты, используя для этих целей *RC*-фильтры, стабилитроны, тиристоры, транзисторы и электромеханические реле. Выбор способа защиты и схемы включения зависит от вида защищаемого устройства, режима его работы и ряда других эксплуатационных показателей.

При защите полупроводниковых устройств плавкими предохранителями приходится считаться с инерционностью их действия. Может оказаться, что время перегорания и разрыва цепи окажется настолько большим, что за это время будут повреждены элементы схемы. Такое положение часто создается в устройствах с полупроводниковыми приборами: предохранитель не сгорел, а приборы повреждены.

Правильный выбор плавкого предохранителя для защиты, например, выпрямителя, заключается в том, чтобы он не сгорел при включении и был бы эффективно действующим, что возможно при его номинальном токе, близком по величине к току нагрузки.

Сущность действия защиты, например, регулирующего транзистора от перегрузки при помощи активного сопротивления в схеме рис. 47 сводится к тому, что при увеличении тока через транзистор возрастает падение напряжения на ограничительном сопротивлении, уменьшая тем самым мощность рассеяния на транзисторе.

Эффективен способ защиты транзисторов от перенапряжений при помощи кремниевых стабилитронов, включаемых параллельно транзисторам, как показано на рис. 47, *б*. Действие стабилитронов заключается в ограничении падения напряжения на транзисторах и рассеяния мощности на них. При этом суммарное напряжение стабилизации стабилитронов должно быть меньше максимально допустимого напряжения

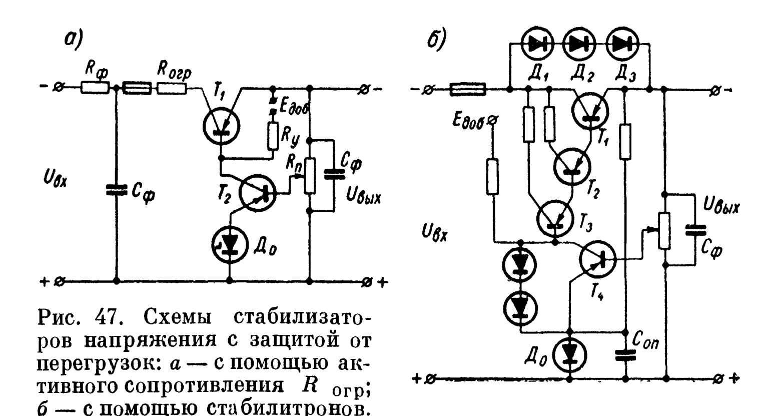


Рис. 47. Схемы стабилизаторов напряжения с защитой от перегрузок: *а* — с помощью активного сопротивления $R_{огр}$; *б* — с помощью стабилитронов.

Рис. 48. Схемы стабилизаторов напряжения с тиристорной защитой от перегрузки: *а* — с применением реле; *б* — с дополнительным транзистором T_1.

на коллекторе транзистора. При этом следует учесть разброс напряжений стабилизации стабилитронов под воздействием меняющейся температуры.

Эффективен также способ использования управляемых кремниевых вентилей (тиристоров) для защиты от перенапряжений и перегрузки по току. В этих случаях создается дополнительная электрическая цепь, на одном из

элементов которой создается падение напряжения, которое является управляющим напряжением для тиристора. Возможны также различные другие варианты цепей обратной связи, причем в одних случаях требуется вспомогательный источник тока, а в других случаях можно обойтись и без такого источника. В качестве примера использования тиристора для защиты от перегрузки по току и напряжению на рис. 48, *а* показана схема стабилизатора с такой защитой. При этом схема стабилизатора полностью не показана, а действие тиристора в схеме очевидно.

В ряде случаев защита полупроводниковых устройств весьма эффективно осуществляется при помощи комбинации дополнительного транзистора со схемой тиристора. Иллюстрацией этому может служить схема рис. 48, *б*, действие которой не требует пояснения.

Во многих случаях эффективными мерами защиты полупроводниковых устройств являются релейные схемы с малоинерционными электромеханическими реле, в том числе с применением современных миниатюрных вакуумных реле.

ЛИТЕРАТУРА

1 Багоцкий В. С., Флеров В. Н. Новейшие достижения в области химических источников тока Госэнергоиздат, 1963.

2 Виноградов Л. В. Энергетика завтрашнего дня Воениздат, 1965.

3. Орлов В. А. Малогабаритные источники тока Воениздат, 1965.

4 Рогинский В. Ю. Преобразователи тока Воениздат, 1960.

5 Рогинский В. Ю. Выпрямители Госэнергоиздат, 1961.

6 Рогинский В. Ю. Электропитание радиоустройств. Госэнергоиздат, 1963.

7. Фридолин Г. Г. Новые источники электрического питания радиоэлектронного оборудования. Обзор отечественных и зарубежных изобретений, ЦНИИПИ, 1964.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 28 коп.

